MBL/WHOI
0 0301 0000944 5

T413

J. THOULET

L'OCÉAN

SES LOIS ET SES PROBLÈMES

PARIS
LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie
79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1904

L'OCÉAN

SES LOIS ET SES PROBLÈMES

GLACIER SMITH (BAIE RED, SPITZBERG) VU DU NIVEAU DE LA MER
(Cliché provenant des Collections de S. A. S. le Prince de Monaco.)

GC 14
T413

J. THOULET

L'OCÉAN

SES LOIS ET SES PROBLÈMES

PARIS
LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie
79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1904

Droits de traduction et de reproduction réservés.

PRÉFACE

Ce livre est un résumé de leçons de géographie physique faites à la Faculté des Lettres de Nancy. Mon auditoire se composait de candidats à la licence, et d'un public éclairé, intelligent, instruit, je n'ai pas besoin de le dire, mais non de savants professionnels, et comme je n'étais pas obligé de me préoccuper de préparer à des examens, j'étais libre de faire mon cours à ma guise. C'est pourquoi j'ai supprimé tout calcul, toute formule et ne suis entré dans la description détaillée d'aucune expérience. Ceux qui désireront ces sortes de renseignements ne seront pas embarrassés pour les obtenir et ils trouveront dans les pages suivantes la bibliographie d'un certain nombre d'ouvrages parmi les plus connus relatifs à l'océanographie. Je me suis d'ailleurs fait un devoir de donner à ce sujet mes conseils à tous ceux qui ont bien voulu me les demander. En revanche, j'ai cherché à présenter des idées générales. Avouerai-je que même quand il s'est agi d'un enseignement véritablement technique, sauf dans le laboratoire, je n'ai jamais cessé de penser qu'il importait assez peu de raconter des détails que chacun peut trouver dans des livres — le soufre est jaune, le sel a une saveur salée, la densité du quartz est 2,61, *— mais qu'il était essentiel de communiquer à ceux qui me faisaient l'honneur de m'écouter, des notions scientifiques générales, une discipline de l'esprit, une tradition qui n'est susceptible de se transmettre qu'oralement parce qu'elle est vraiment l'âme du professeur, le fruit du labeur de sa vie entière. On me pardonnera la conviction où je suis que l'enseignement supérieur doit*

s'adresser à des disciples, non à des élèves et moins encore à des écoliers.

En me livrant aux études que je poursuis depuis longtemps, j'ai rencontré quelques maîtres et quelques ouvrages qui ont exercé sur moi une influence profonde. Parmi eux est Mohr dont je n'ai cessé d'admirer la magnifique « Geschichte der Erde ». On y découvre des erreurs ; cela est sans grande importance. Une erreur matérielle scientifique se corrigera tôt ou tard et plutôt tôt que tard, car il ne manque pas de gens plus habiles à suivre autrui pour vivre de ses miettes qu'à marcher hardiment en avant. Mohr possède l'ampleur de vues d'un véritable maître. Quand je voyageais, j'ai traversé les marais et les fondrières, j'ai supporté sans me plaindre la fatigue sous le soleil et sous la pluie lorsqu'on m'a nettement montré le but vers lequel j'avais à me diriger ; si je me suis parfois égaré, douloureusement heurté contre les obstacles, j'ai toujours fini par retrouver mon chemin dès que j'ai su où il devait me conduire. Dans la première édition de son ouvrage, Mohr a réuni sous forme de ce qu'il appelait des thèses, les points principaux qui constituaient sa foi scientifique et qu'il avait cherché à mettre en lumière dans le reste de son livre. Il y a dans ce procédé une franchise, une loyauté dignes de respect. Avec le dédain des faux-fuyants, la fière conscience de soi-même, la hardiesse à prendre sa part, toute sa part de responsabilité, quoi que réserve l'avenir, confirmation ou désaveu, on aura accompli son devoir parce que si le savant risque beaucoup, risque tellement qu'il est sûr d'y perdre, en revanche la science est certaine d'y gagner. J'ai essayé d'imiter mon modèle dans la mesure de mes forces et c'est pour cela que je vais résumer, pour ce qui touche à l'océanographie, quelques-unes des conclusions auxquelles j'ai été amené, mes thèses qui sont mes convictions d'aujourd'hui. Peut-être ne seront-elles plus celles de demain. Je ne refuse à personne, pas même à moi-même, le droit, le devoir de me démentir — avec preuves à l'appui, bien entendu.

Je suis pénétré de l'importance de l'océanographie au point de vue pratique comme au point de vue théorique. Je laisserai de côté ce qui concerne la pratique : navigation, pêche et télégraphie sous-marine, sujets sur lesquels je me suis suffisamment

étendu en maintes circonstances. Ici le point de vue théorique doit être plus spécialement exposé. La géologie est l'océanographie du passé et pour la connaître réellement, sérieusement, scientifiquement, il faut procéder avec méthode, du plus certain au moins certain, du présent au passé, de l'océan d'aujourd'hui à l'océan d'il y a mille milliers d'années. On ne sait pas ce qui s'accomplit en Méditerranée, à une heure au large de Marseille et on parle sans hésiter de ce qui avait lieu au fond de la mer crétacée, dévonienne ou silurienne! Toute opinion ou assertion qui n'est appuyée ni sur un chiffre, ni sur une mesure, ni sur une expérience, tout ce qui, dans l'histoire ancienne du globe n'est pas démontré être un phénomène sinon identique, du moins comparable à ceux d'aujourd'hui est rêverie pure. L'évolution se fait avec une implacable rigueur pour l'ensemble des connaissances humaines. Les sciences physiques et chimiques passent aux sciences mathématiques, les sciences naturelles aux sciences physiques et chimiques. La minéralogie des vieux naturalistes a franchi la limite, c'est maintenant au tour de la géologie par l'océanographie. Si des modifications anciennes aux phénomènes actuels sont constatées, si l'on veut me forcer à admettre pour un océan crétacé ou jurassique, des faits différents de ceux que je suis capable de voir de mes yeux, de mesurer de mes mains, j'exige d'en savoir les motifs non pas basés sur l'opinion de tel ou tel maître — j'en ai vu tellement apparaître, de ces maîtres, apparaître et disparaître, — mais motifs rigoureux, pesés sur une balance, mesurés sur la platine graduée d'un microscope, avec un appareil de verre ou de cuivre décrit dans ses moindres détails afin que je puisse, s'il me convient, recommencer à mon gré la mesure et affirmer ensuite contre n'importe quel contradicteur, qu'elle est exacte et alors être convaincu, ou qu'elle est fausse et en fournir la preuve. Je ne parle en ce moment que de l'étude des couches sédimentaires, que de la partie de la géologie qui concerne la stratigraphie. Quant à ce qui touche les roches cristallines, il en est de même. C'est aux chimistes et aux physiciens à apporter la clarté dans le chaos de la pétrographie. Dès qu'on aura élucidé la chimie de la silice, celle du règne inorganique, comme l'a été la chimie du carbone et de l'azote qui est celle du règne organique, puis qu'on aura méthodiquement,

par analyse et par synthèse, chimiquement et physiquement, résolu le problème des alliages métalliques devenu facile grâce aux ressources dont dispose maintenant la science, l'étude des roches deviendra aussi simple, rationnelle et définitive que la chimie organique, et elle ne ressemblera guère à la pétrographie actuelle.

Tout minéral porte la trace de tous les événements auxquels il a assisté. Le moindre grain de sable raconte l'histoire de son existence. Le but de la science est d'écouter ces récits, de les comprendre, de corroborer les dires des uns par les dires des autres et de reconstituer ainsi les faits d'un très lointain passé dans l'entière splendeur de leur vérité. L'œuvre est longue, plus d'un savant y usera ses forces et sa vie et néanmoins elle est possible et elle s'accomplira.

L'océanographie ressemble à la géographie dont on a donné une définition très juste en l'appelant un carrefour de sciences. En son état présent, elle exige de ceux qui s'en occupent des connaissances étendues et variées. Elle est un art autant qu'une science. Gardons-nous de croire, cependant, qu'elle dédaigne les spécialités. Elle en a d'autant plus besoin qu'elle s'étend davantage et qu'il est impossible à un homme de tout approfondir quels que soient son dévouement, son ardeur et son intelligence. Les spécialistes sont nécessaires à la condition qu'ils ne le soient pas devenus trop tôt. Tout en poursuivant leurs recherches dans une voie particulière, ils ne doivent pas oublier que leur tâche n'est qu'une fraction d'un ensemble. Pour construire un palais, on prend des maçons, des tailleurs de pierres, des peintres, des charpentiers, des menuisiers, mais auparavant un architecte s'est chargé de dresser les plans et de faire comprendre à chacun que l'œuvre de sa spécialité n'est pas destinée à rester isolée et qu'elle se rattache à d'autres œuvres dont l'ensemble sera l'édifice. Les spécialistes, travailleurs de la main ou travailleurs de l'esprit, sont indispensables, mais ils doivent s'entr'aider. C'est la façon d'obéir à l'architecte. La découverte de la vérité est une œuvre d'assistance mutuelle. Pour faire de l'océanographie, il faut être toujours un peu architecte : savoir beaucoup de choses à peu près bien et très bien une certaine chose.

Plus on regarde les phénomènes naturels, plus on y aperçoit

la complication et moins on y voit le hasard. On comparerait volontiers un phénomène auquel prennent part toutes les forces naturelles à une équation unique à un nombre immense d'inconnues. Une telle équation n'est résoluble ni mathématiquement ni matériellement. Le savant la considère avec son intelligence, ses connaissances et, disons le mot, son flair scientifique qui est, pour une part son cerveau et pour une autre part plus grande qu'on ne le suppose, l'intégrale des années écoulées depuis qu'il reste debout à côté de ses verres et de ses entonnoirs, assis à sa table de microscope ou à bord d'un bâtiment, s'il est océanographe. C'est une somme de travail et d'abnégation. Il choisit parmi toutes les forces actives les cinq ou six qui lui semblent jouer le rôle prépondérant. Le moment de la spéculation est alors passé ; s'il y persistait, il philosopherait et serait perdu. Il retrousse ses manches et se salit les mains. Des cinq facteurs les plus essentiels, il prend le premier et comme il ne peut anéantir les quatre autres, par un procédé qu'il invente, pratiquement et non intellectuellement, il les rend constants. Il le fait varier ; avec des instruments en verre ou en cuivre, avec des tubes, des miroirs, il étudie les variations du phénomène total en fonction de celles de l'unique variable conservée et il en trace la courbe. Il opère ensuite sur la seconde variable isolée comme sur la première rentrée maintenant dans la masse des constantes et il trace une seconde courbe. Successivement il trace les cinq courbes. Le phénomène est analysé et désormais, lorsque dans la nature, le savant le constatera, il sera le plus souvent en état de l'expliquer grâce à la comparaison qu'il fera de ses courbes dont chacune figure le rôle d'une force. Une manifestation naturelle quelconque est une totalisation, une addition algébrique de termes ayant des valeurs différentes, positives ou négatives, grandes ou petites, variables et susceptibles de se combiner de mille façons pour apporter un même résultat. Le pouvoir d'explication rétrospective est très grand, celui de prévision est resté bien faible. Quand l'homme sera dans l'obligation absolue de prévoir, comme en météorologie, car le laboureur et le marin ont l'impérieux besoin de savoir le temps du lendemain, il procédera empiriquement, observera sans se lasser, dressera des moyennes, établira des probabilités et se trompera souvent. La science a des aspi-

rations infinies ; en réalité elle est cruellement limitée par l'infinie faiblesse de l'intelligence humaine et l'infinie complication des phénomènes naturels. C'est beaucoup que l'homme sache qu'il ne sait pas beaucoup et qu'il ne saura jamais beaucoup.

Je me suis servi de termes mathématiques afin d'exprimer plus nettement ma pensée et pourtant, dans la majorité des cas, les mathématiques sont une aide précaire pour l'explication des phénomènes naturels. Elles sont l'idéal et non la réalité ; elles sont simples et la nature ne l'est pas. Le signe de l'égalité qui est la base de leurs raisonnements est une absurdité matérielle puisqu'il n'existe pas sur la terre entière deux feuilles d'arbre mathématiquement égales, ni au fond de l'océan deux grains de sable rigoureusement égaux, ni dans la masse entière des eaux océaniques deux gouttes absolument identiques. L'usage abusif des mathématiques en histoire naturelle, le fanatisme des décimales ont fait commettre de grosses sottises dont il serait facile de citer des exemples. Les mathématiques sont un outil précieux pour certaines besognes, inutile et même dangereux pour certaines autres. En cours de travaux, pour essayer d'éviter quelque peine et de gagner du temps, j'ai sollicité l'aide des mathématiciens ; malgré toute leur bonne volonté, ils n'ont jamais manqué de protester que je leur posais des problèmes tellement compliqués qu'il leur était impossible de les résoudre. J'en étais donc réduit à traiter les questions expérimentalement : j'installais l'expérience, je mesurais les résultats, je les mettais en courbe et j'obtenais une solution satisfaisante en ce sens qu'elle était adéquate à la nature. En science naturelle, les mathématiques doivent régner et ne pas gouverner ; comme pour le latin, il est indispensable d'en avoir fait afin d'assouplir l'esprit à leur bienfaisante discipline et non moins indispensable de n'en plus faire ensuite. Combien plus sage est la phrase de Mohr conseillant l'interrogation expérimentale directe de la nature qui répond à toutes les questions qui lui sont adressées, par un oui, ou bien par un non ou bien par le silence, et dans ce cas, celui qui l'a interrogée a mal posé sa question.

L'océanographie, qui n'est pas la zoologie, y touche cependant de très près. L'être vivant est un instrument d'une extrême délicatesse et en même temps très difficile à manier pour deux rai-

sons. La première est qu'au lieu de n'indiquer qu'une unique variable comme le thermomètre la température ou le baromètre la pression, il en mesure un ensemble : toutes les conditions du milieu ambiant, sans en excepter une seule. En second lieu, sa graduation est restreinte ; elle ne comporte que trois degrés : la présence abondante si toutes les conditions sont favorables ; la présence rare ou l'état précaire des individus quand parmi les conditions il en est une ou plusieurs médiocrement favorables ; l'absence lorsqu'il s'en trouve une ou plusieurs franchement défavorables. La géologie sera transformée lorsque la zoologie aura déterminé pour un animal, la relation existant entre les conditions de sa vie et les données précises extérieures, température, pression, profondeur, lumière, nature du fond préféré et le reste. Les fossiles commenceront alors à parler et à dire autre chose que leur nom ; ils raconteront leur histoire depuis leur naissance et même celle d'après leur mort : ce qu'était l'océan où ils habitaient et qui a disparu depuis des siècles de siècles, sa configuration, ses limites, la température, la salure de ses eaux, sa profondeur, le parcours et la vitesse des courants qui le sillonnaient, la puissance de ses vagues, les vents qui les soulevaient, les pentes abruptes ou adoucies des rivages et plus tard, lorsque le sol sous-marin où étaient enfouis ces fossiles sera devenu terre sèche, ils en diront les plissements, ils en indiqueront l'érosion. Cet espoir n'est pas un rêve ; il se réalisera le jour où les trois spécialistes, l'océanographe, le zoologiste et le stratigraphe consentiront à travailler ensemble et d'accord.

Les lois principales de l'océanographie sont pour la plupart connues et maintenant, sans perdre de vue l'ensemble, il faut se livrer à l'étude du détail. Le temps des grandes explorations est passé et, sous peine d'éparpiller inutilement ses efforts, il faut avoir le courage de se cantonner dans les espaces restreints et de chercher à les connaître complètement. Grâce aux congrès internationaux, des conventions ont à peu près réglé l'uniformité du travail et deux observateurs, aux deux extrémités du globe, sont presque certains de pouvoir comparer entre eux les résultats qu'ils auront obtenus. L'océanographie doit progresser de proche en proche, à partir de points isolés, en tache d'huile.

On trouvera dans ce livre l'indication de certaines recherches

qui me paraissent intéressantes à tenter. C'est une toute petite partie des travaux que j'entreprendrais si je devais vivre encore quelques siècles, sans compter ceux que je rencontrerais en route. C'est une joie que de découvrir le moindre des mystères de l'immense nature. En vérité, les jeunes savants sont heureux ; ils possèdent le présent — leur force et leur jeunesse — et ils ont le droit d'espérer dans l'avenir.

Un dernier mot. Pour chaque chapitre, j'ai donné un court historique du sujet traité. Ce n'est pas la satisfaction d'une vaine curiosité, mais un enseignement. L'homme est une humble image de l'humanité ; quelque chose qu'il entreprenne, il procède le plus souvent comme a procédé l'humanité ; l'histoire des tâtonnements de l'une rendra plus assurée la marche de l'autre. Et puis, n'est-il pas juste d'appeler la reconnaissance et le respect sur les précurseurs, ceux qui ont ouvert la voie, qui trop souvent ont été à la peine plus qu'ils n'ont été à l'honneur? Si j'ai tenu à citer les noms de Marsigli, de Marc Lescarbot, Chappe d'Auteroche, Buache, Marcet, Aimé, de Roujoux, Dupetit-Thouars, de Tessan, Bérard, Delesse et d'autres encore, c'est que j'ai constaté avec tristesse que nous étions ingrats pour ceux qui, dans notre pays, avaient eu la gloire de créer l'océanographie, en avaient fait une science de français et, malgré leurs efforts, avaient si peu réussi, hélas! à en faire une science française

L'OCÉAN

SES LOIS, SES PROBLÈMES

CHAPITRE I

PROCÉDÉS EMPLOYÉS POUR L'ÉTUDE DU RELIEF SOUS-MARIN

Si nous considérons dans son ensemble la masse énorme des eaux de l'océan, nous constatons d'abord que des contours irréguliers la séparent nettement des masses continentales qui bordent son bassin et sont les côtes maritimes et ensuite que sa profondeur est variable. Dès le début, nous avons donc à répondre à deux questions : quelle est la forme des limites communes à la terre et à la mer et la réponse est du domaine de la géographie — quel est le relief du lit caché de l'océan dont la profondeur, quelque grande qu'elle soit, n'est certainement pas infinie. En effet, si d'un navire retenu par le calme, immobile au milieu de la mer, on jette pardessus bord un objet pesant quelconque, on le voit descendre à travers l'eau bleue qui lui communique ses teintes glauques ; son éclat s'affaiblit, il disparaît mais, continuant sa chute verticale, il doit tôt ou tard atteindre le terrain solide. On ne saurait admettre l'existence d'abîmes, puisque la Terre étant un globe isolé, aucun de ses diamètres ne peut être infini. A quelle distance sera ce fond? Sera-t-il partout, sous la vaste étendue des flots, également éloigné de la surface? L'humanité à son aurore s'est déjà posée ces problèmes. Ils sont aujourd'hui résolus sinon complètement, du moins suffisamment pour donner satisfaction à nos premiers et plus importants besoins théoriques et pratiques. Il a fallu pour cela

trois mille ans de travail; la science est un fruit qui mûrit lentement.

Les peuples antiques, Chaldéens, Égyptiens, Hébreux, avaient tous eu leur imagination saisie par la majesté de la mer; ils avaient été émus par ses grandeurs et par ses colères et elle les avait remplis d'une crainte sacrée. Ils avaient considéré l'océan comme la demeure de la divinité, comme l'état initial de la matière sortant du chaos et cherchant à s'organiser sous la toute-puissante injonction divine. La notion sacrée de la mer entre dans tous les mythes primitifs. Aucun peuple n'éprouva ce sentiment de terreur plus violemment que les Hébreux. On en trouve les preuves presque à chaque page des livres saints. Ils ne possédaient point de débouchés sur la mer et s'isolaient autant qu'ils le pouvaient des autres peuples. Cependant, du haut de leurs montagnes, ils l'apercevaient au loin assez pour être certains de son existence et par conséquent pour croire ce qu'ils en entendaient raconter. Beaucoup d'entre eux, faits prisonniers de guerre et réduits en esclavage par les Phéniciens, avaient dû être embarqués de force par ceux-ci sur leurs vaisseaux afin de servir de rameurs. Que l'on suppose quelques-uns de ces esclaves, au retour d'une de ces navigations, parvenus à s'enfuir et à rejoindre leurs concitoyens. Leurs terribles récits exagérés encore, s'il est possible, par l'imagination orientale, ont sûrement contribué à répandre et à conserver chez les Hébreux la tradition de cette terreur.

Il en était autrement pour les Phéniciens, probablement la plus ancienne de ces thalassocraties, Pélasges, Lydiens, Milésiens, Cariens, Phocéens et autres qui, concurremment ou successivement, régnèrent sur la Méditerranée. Il y eut cependant entre eux une différence. Les Grecs furent des pirates artistes, tandis que les Phéniciens furent des pirates commerçants. Venus, dit-on, du golfe Persique, établis ensuite sur la côte Est de Syrie, entre le Liban et la mer, ils rayonnèrent sur les rives asiatiques de la mer Égée, puis sur l'Archipel, la Grèce et de là, vers les VI et Ve siècles avant l'ère chrétienne, sur le bassin entier de la Méditerranée qu'ils jalonnèrent de leurs comptoirs. Tout conspirait pour faire de ces

peuples des marins ; ils ne pouvaient être que ce qu'ils furent. Pays bordé par la mer et, il est vrai, presque sans ports, mais à peine l'avaient-ils quitté qu'ils arrivaient dans la mer Égée où ils trouvaient des côtes extraordinairement découpées et offrant au navigateur des multitudes d'abris en cas de mauvais temps, îles semées au milieu des flots pour servir de stations et faciliter par une série d'étapes les grandes traversées. Leurs montagnes couvertes de forêts fournissaient d'excellents bois de construction, le climat était doux et clément et, ce qui est mieux, leur intelligence était remarquablement douée pour le négoce, audace mêlée de prudence qui les poussait aux aventures et, en cas de besoin, les aidait à en sortir à leur avantage. A tant de conditions si favorables, s'ajoutaient même pour ces Méditerranéens, leurs défauts, leur incapacité politique faite de haines et de jalousies, leur intolérance féroce qui alternativement transformait chacune des moitiés d'une même tribu, grande ou petite, l'une en tyrans, l'autre en troupeau de victimes, défauts incurables puisqu'ils se continuent encore chez leurs descendants, défauts qui les chassaient de leur propre pays et, de temps à autre, les forçaient à essaimer au loin.

Chez ces peuples, les questions relatives à la mer étaient plus qu'importantes, elles étaient indispensables. Elles se présentaient toutes ensemble et à chacune il fallait une solution immédiate : constructions navales, connaissance des côtes, c'est-à-dire géographie, données astronomiques pour se guider. Le fond même des eaux prenait un intérêt et la recherche de tant de problèmes commencée par la nécessité, était continuée par la curiosité. Le premier sondage a été exécuté par le premier homme qui a vogué sur les eaux, monté sur le plus humble des radeaux, fût-ce sur un tronc d'arbre car, en abordant, il a cherché soit à s'approcher du rocher descendant à pic dans la mer afin de débarquer plus aisément, en laissant son embarcation à flot et pouvoir se rembarquer, soit une plage sableuse en pente douce afin de s'y échouer et d'y tirer sa pirogue au sec pour la mieux réparer et la mettre à l'abri de la tempête. Dans les deux cas, il fallait savoir mesurer la profondeur du regard ou avec la perche servant d'aviron ou, le bateau

devenant plus grand et l'eau moins transparente, avec une corde à laquelle on avait attaché une pierre pour la laisser mieux enfoncer. Telle fut la première sonde. Ainsi s'accumulaient les problèmes théoriques et pratiques d'astronomie et de géographie : étudier les localités et leurs ressources, choisir les routes les plus directes, distinguer les meilleurs points de relâche le long des côtes. Bien qu'il ne nous reste aucun document, les connaissances devaient être bien plus considérables qu'on ne serait tenté de le croire chez ceux qu'on a nommés les Plus Anciens, antérieurs à Homère, environ mille ans avant l'ère chrétienne.

L'histoire du progrès des sciences afférentes à la navigation se partage en époques distinctes. Certains pensent que l'humanité marche d'un pas régulier vers ce qu'on n'ose plus appeler le progrès, ce mot dont on a tellement abusé qu'il a fini par perdre son sens et même le sens commun, mais le perfectionnement. Il n'en est rien. Si les besoins des hommes ont été toujours les mêmes, si d'une façon continue, à force de travail et de tâtonnements toujours douloureux puisqu'ils sont des enfantements, on a réussi à les satisfaire, il existe pourtant des tournants dans l'histoire. Contrairement à ce qui se passe dans la nature inanimée, l'humanité avance surtout par bonds. Une somme de perfectionnements s'est accomplie qui satisfait aux besoins principaux d'une époque, l'humanité a procédé à une sorte d'installation et elle s'y tient. Tout à coup survient un événement qui est peut-être le résultat d'aspirations latentes ; après une incubation si lente qu'elle est imperceptible sinon aux esprits les plus perspicaces, les conditions ambiantes sont changées de fond en comble. La crise est générale ; il en résulte une modification profonde de l'état d'équilibre précédent et de nouveaux perfectionnements qui d'ailleurs ne manqueront pas de s'effectuer, sont rendus obligatoires dans les parties en apparence les plus étrangères au fait qui les a motivés. Tel l'hégémonie politique et intellectuelle de la Grèce, l'apparition, la puissance et la chute de l'empire romain ; plus tard les Croisades, la découverte de l'Amérique, l'invention de l'imprimerie et, de nos jours, l'utilisation de la vapeur et de l'électricité.

A considérer spécialement le développement des sciences qui concernent la mer, on distingue quatre grandes périodes. D'abord l'antiquité et le moyen âge. La troisième période commence avec les voyages des Portugais et des Espagnols, avec Magellan qui en 1521 tenta le premier sondage en eau profonde. Elle se continue jusqu'au milieu du XVIIIe siècle. Alors s'ouvre la période moderne.

S'il s'agissait de présenter un tableau détaillé du progrès des connaissances géographiques et océanographiques, on devrait, pour chacune de ces périodes, établir des subdivisions. Pour l'antiquité, on distinguerait d'abord les temps antérieurs au Xe siècle, l'époque d'Homère et d'Hésiode, celle des thalassocraties méditerranéennes, phéniciennes et grecques. Au ciel, les marins se guident d'après l'étoile polaire — l'étoile phénicienne — ou la constellation de la Grande Ourse; l'océan est un vaste fleuve entourant la terre et ces connaissances suffisent jusque vers l'an 800. L'expansion des multitudes de petites métropoles maritimes prend toute son ampleur; elles essaiment partout, marchant principalement de l'Est vers l'Ouest, comme le soleil dans son mouvement apparent. Les renseignements pratiques abondent, constatés par ceux qui vont au loin, classés, réunis en corps de doctrine par ceux qui sont restés. L'École Ionienne jette un vif éclat aux VIe et Ve siècles avec Thalès de Milet, Anaximandre qui emploie le gnomon à mesurer les latitudes terrestres, Hécatée et Hérodote qui sait que les marins se dirigent au moyen de sondages en approchant des terres basses du delta d'Égypte et comptent les distances ainsi que les profondeurs en orgyes ou brasses. Tout se perfectionne et en particulier la géographie avec les procédés cartographiques servant à représenter les nouvelles découvertes. Dessins informes au début, les cartes se précisent lentement, la notion de la rondeur de la Terre se généralise et c'est seulement lorsque les procédés de mesure font défaut qu'on cherche à se rendre compte par le seul raisonnement et par conséquent sans succès, de la profondeur des océans, de la salure de la mer, de tous les phénomènes qui frappent les sens et éveillent l'étonnement.

Au IVe siècle, Aristote donne son nom à une école et son influence

néfaste se fait sentir pendant vingt siècles. Pourtant ses élèves lui sont supérieurs. Par une sorte de loi naturelle ou intellectuelle, il est rare que les disciples d'un maître ne poussent pas à l'excès ses qualités positives ou négatives; ils lui obéissent plus qu'aveuglément ou bien réagissent violemment contre ses doctrines. A ce maître qui osant tout traiter par des raisonnements, œuvres de tête, et qui dédaignant les faits et les mesures, œuvres de sens et de mains, était conduit à des absurdités, succèdent des disciples expérimentateurs qui rendent d'immenses services à la science. L'humanité les paie par l'oubli tandis qu'elle exalte Aristote jusqu'à en faire un oracle impeccable. Quel fatal pouvoir que celui des mots ! Théophraste est un minéralogiste de génie et, en géographie, Dicéarque a l'idée de dresser les cartes par coordonnées de distance à une ligne unique, le diaphragme. Pendant ce temps, Pythéas de Marseille, cette autre Grèce, fixe la latitude de sa ville natale à quinze minutes près et exécute ses deux magnifiques campagnes de découvertes, la première dans le nord de la Grande-Bretagne, la seconde dans le golfe Mentonomon, la Baltique actuelle.

Aux IIIe et IIe siècles, la connaissance de la terre et de la mer accomplit de nouveaux progrès et il en est de même de l'astronomie et de la cartographie, grâce à Eratosthène qui donne une première évaluation précise de la longueur de la circonférence terrestre; Hipparque qui fixe la position de divers lieux au moyen de coordonnées astronomiques, Cratès de Malle, qui construit le premier globe. Au Ier siècle avant J.-C. appartiennent Posidonius astronome, géographe, océanographe et voyageur; Strabon, si habile à décrire, et à comparer entre elles les diverses contrées connues; Hippale, précurseur de l'américain Maury, navigateur sagace, qui découvre le phénomène des moussons et s'en sert pour ouvrir une route régulière entre la mer Rouge et l'Inde. Enfin, au IIe siècle après J.-C., paraît l'illustre astronome et géographe Ptolémée.

En résumé, en géographie et en océanographie, le gain de l'antiquité est le suivant. On connaît la Méditerranée, l'Europe, sauf les régions les plus septentrionales, le nord de l'Afrique et le nord du bassin de la mer Érythrée; les cartes sont tracées par coordonnées

astronomiques, on admet que les mers sont partout sensiblement au même niveau et que leur profondeur variable peut devenir infinie dans les abîmes ou gouffres du Pont-Euxin mentionnés par Aristote.

Pendant le moyen âge, les progrès sont nuls ; on raisonne et par conséquent on déraisonne. L'humanité retourne en arrière. Il faut en arriver à Magellan en 1521 pour assister à une expérience, un acte de bon sens consistant à interroger directement la nature au lieu de passer par les livres, comme si tout ne s'écrivait pas et surtout ne s'imprimait pas ! Le papier est patient. Magellan pendant son voyage de circumnavigation, au milieu du Pacifique, entre deux îles désertes qu'il nomme les îles Infortunées, Saint-Paul par 15 degrés et les Tiburones par 9 degrés de latitude sud, envoie à la mer une très longue ligne de sonde. Il ne parvient pas à toucher le sol et il en conclut qu'il se trouve précisément au-dessus du point le plus profond de la mer. L'expérience était bonne, la conclusion absurde ; il n'y avait donc que demi-mal, car un fait nettement constaté, positif ou négatif, demeure toujours, tandis qu'une explication ne dure jamais que le temps d'en trouver une meilleure ou une plus mauvaise.

L'insuccès de Magellan avait été précédé, cent ans auparavant, dès le milieu du xve siècle, par l'invention d'un appareil très simple, dont la disposition était particulièrement originale et ingénieuse et qui n'avait que le seul défaut de ne pas fonctionner. Il s'agit de l'*Explorator profunditatis, distantiæ, abyssi*, autrement dit du sondeur libre automatique. Il a occupé le monde scientifique plus de trois siècles et a été encore repris récemment, d'ailleurs sans meilleur succès, sous le nom de rhéobathomètre. Si le sol sous-marin est tellement profond qu'il soit indispensable, pour l'atteindre ou ne pas l'atteindre, d'employer une ligne de sonde d'une longueur extraordinaire, ne serait-il pas possible de supprimer cette corde ? on enverrait au fond un système composé d'un corps léger entraîné par un corps pesant. Si, au moment du contact avec le sol, on parvenait à faire se détacher automatiquement le corps lourd, celui-ci resterait perdu, mais il mettrait en liberté le corps

léger qui, abandonné à lui-même, remonterait seul à la surface. En notant le temps écoulé pour le double voyage de descente et de remontée, un calcul permettrait d'en déduire la hauteur de la colonne d'eau comprise entre la surface et le fond, c'est-à-dire la profondeur de la mer. Le véritable inventeur, vers 1450, fut le cardinal Nicolaus Cusanus. Son appareil consistait en une boule de bois ou de métal creux munie d'un crochet auquel était suspendu un cylindre métallique recourbé en forme de demi-lune et qui se détachait en heurtant le fond. Ce sondeur fut réinventé une centaine d'années après, en 1563, par l'allemand Puehler, puis encore un siècle plus tard, en 1735, par un architecte italien du nom d'Alberti. En 1667, l'anglais Hooke l'inventa pour la troisième fois et le perfectionna à deux reprises différentes en y ajoutant une sorte de voyant permettant d'apercevoir le flotteur de plus loin, puis une bouée et une hélice avec compteur de tours. L'italien Ucciali modifia de nouveau la disposition de ses crochets et, comme le Français Rochon s'était servi dans l'Océan Indien de l'appareil de Hooke, la plupart des nations européennes avaient travaillé à ne pas résoudre le problème.

Simple ou compliqué, l'appareil était incapable de donner un bon résultat; il appartenait, quelle que fût sa forme, à la trop nombreuse série des découvertes faites par des gens qui ne sont pas du métier. L'océanographie connaît beaucoup de ces inventeurs qui n'ont jamais mis le pied à bord d'un bâtiment, découvreurs d'appareils, de méthodes de signaux phoniques par temps de brume, de thermomètres électriques et autres. Pour en revenir au sondeur libre automatique, son grave inconvénient, si grave qu'à lui seul il en proscrivait complètement l'usage, était qu'en mettant toutes choses au mieux, jamais on ne saisissait le moment où il réapparaissait à la surface de l'eau après son voyage jusqu'au sol sous-marin. Or, la moindre erreur de temps implique d'énormes écarts dans l'évaluation de la profondeur. Eût-on aperçu le flotteur au moment même de son émersion, comme jamais il ne réapparaissait au-dessus de l'endroit où il avait été immergé, il est évident qu'il avait été détourné de sa route par un ou plusieurs

courants sous-marins dont la résultante seule était connue et qui avaient augmenté considérablement la durée de la remontée. Du reste, le plus souvent, il était impossible de retrouver le flotteur.

Dès le commencement du XVIIIe siècle, en 1707, le comte de Marsigli s'était livré à l'étude du lit de la Méditerranée le long des côtes du Roussillon, du Languedoc et de la Provence. Les fonds examinés par lui ne dépassaient guère 200 ou 300 mètres, car il n'avait point de grand navire à sa disposition et, obligé de ne se servir dans ses explorations que de barques de pêche, il lui était aussi impossible de s'éloigner trop de terre que cela eût été dangereux. Les corsaires algériens venaient s'embusquer jusque derrière les rochers et dans les criques des petites îles qui bordent la côte pour enlever les bâtiments passant à leur portée ou descendre à terre y piller les villages et y faire des prisonniers. Marsigli lui-même faillit un jour être pris. Il n'indique pas, dans son livre magistral, *Histoire physique de la mer*, le procédé dont il se servit pour ses sondages. Il est probable qu'il employa ceux qui étaient alors communément en usage, la ligne de chanvre avec poids en plomb. Quoi qu'il en soit, il multiplia les coups de sonde et en reporta les résultats sur des cartes où il indiqua la falaise sous-marine qui règne au large du golfe du Lion, se rapproche de terre devant Marseille et en devient tellement voisine, en s'avançant vers l'Est, qu'elle finit par lui être juxtaposée. Il fut ainsi amené à énoncer des lois topographiques si exactes que les travaux ultérieurs n'ont fait que les confirmer :

La disposition des chaînes de montagnes et celle du bassin océanique présentent entre elles des rapports étroits. C'est ainsi que les mers profondes et les côtes élevées se correspondent et inversement.

L'étude complète d'une région limitée permet de conclure des lois applicables au bassin océanique tout entier.

Le fond de la mer n'offre nulle part d'insondables abîmes; il est topographiquement la continuation des rivages.

Marsigli déduisit de ces lois l'analogie de structure symétrique entre la côte européenne et la côte d'Afrique sur le bord opposé

de la Méditerranée et l'évaluation de la profondeur probable de cette mer qu'il fixa à 1 400 toises ou 2 730 mètres alors que, dans cette région, elle est en réalité de 2 785. C'était, il faut l'avouer, trop d'exactitude et seulement l'effet d'un heureux hasard. Il partagea le bassin océanique en zones, l'une étant ce que les océanographes modernes ont appelé le rivage, puis la plage et enfin la mer proprement dite divisée elle-même en « plaine ou côte sous l'eau, entre le bord et 60, 70 et parfois 150 brasses de profondeur et l'abyme », ce qui est presque la division actuelle. Enfin, non content de tracer des cartes-plans du fond, Marsigli établit de nombreuses sections qui lui permettaient de figurer en même temps la profondeur de la mer, la pente et la nature lithologique du sol.

L'art de représenter le relief sous-marin avait fait en 1737, un immense progrès grâce à l'ingénieur hydrographe français Buache qui appliqua aux régions sous-marines une découverte récente de l'ingénieur hollandais Cruquius. Celui-ci, levant en 1729 le plan de la rivière Merwede, avait sur son dessin, entouré d'un trait l'aire occupée par tous les points situés à égale distance au-dessous de la surface de l'eau. Par ce procédé, l'œil apercevait d'un seul coup, d'après la façon dont les courbes isobathes, pour leur donner le nom qui les désigne, se rapprochaient ou s'écartaient les unes des autres, la pente plus ou moins abrupte du sol. L'avantage était considérable. En ces sortes d'études, on ne saurait trop parler aux yeux, car il n'est point d'investigateurs plus précis, de plus prompts découvreurs de vérité. Buache fit servir ce mode de représentation pour le fond de la mer et publia une carte de la Manche dressée dans ce système. Le procédé se répandit. Onze ans après, en 1748, il était employé à la représentation du sol subaérien pour le figuré du terrain dans le voisinage de forteresses par un ingénieur militaire français, Millet de Mureau. Sous le nom d'isohypses, ces courbes sont encore employées au même usage. Les cartes du relief sous-marin se font toutes aujourd'hui par isobathes. On a même l'habitude, dans le but de laisser mieux apparaître les formes, de couvrir les aires isobathes d'une teinte

plate bleue d'autant plus intense que leur profondeur est plus grande.

Les essais pour atteindre réellement le fond de la mer ne reprirent d'une façon sérieuse que vers 1835. Auparavant, les besoins de la navigation faisaient donner des coups de sonde, mais par faibles profondeurs seulement. Le mer d'Azow fut sondée en 1696 par les Russes, la Baltique en 1710, la mer Blanche de 1798 à 1801. Pour de grandes profondeurs, on continuait aussi infructueusement à ajouter les longueurs de lignes aux longueurs de lignes. Quoi qu'on fit, on n'arrivait pas au fond ou, si l'on y parvenait, on n'en avait pas la certitude. On cite d'effroyables sondages. Le lieutenant Parker, de la marine des États-Unis, dévida en vain 50 000 pieds de corde. Les beaux voyages d'études français de la fin du XVIIIe et du commencement du XIXe siècle eurent des résultats à peu près nuls au point de vue de la topographie sous-marine. Les efforts pour atteindre les grands fonds de Bougainville, Lapérouse, d'Entrecasteaux et même de Freycinet sur l'*Uranie* en 1817, Duperré sur la *Coquille* en 1822, Dumont d'Urville dans ses deux expéditions en 1827-1828, et 1838-1840, Vaillant sur la *Bonite* en 1836-1837, Dupetit-Thouars sur la *Vénus* de 1836 à 1839 furent aussi infructueux. Les Anglais n'étaient pas plus heureux. Sir James Clark Ross, avec l'*Erebus* et la *Terror* en 1839, ne réussit pas avec 3 600 brasses (16 583 m.) de ligne et un plomb pesant 76 livres. Cependant il toucha le fond avec 2 425 brasses (4 434 m.) le 3 janvier 1840 et 2 677 brasses (4 895 m.) le 3 mars de la même année, dans l'ouest du cap de Bonne-Espérance. Ces opérations exigeaient un temps énorme, un matériel très coûteux et des conditions exceptionnelles, mer parfaitement calme et absence de courants. Encore était-on incertain d'une réussite dont la seule preuve indiscutable devait être une trace matérielle du sol sous-marin bien rarement rapportée par le plomb de sonde. Les courbures de la ligne pouvaient, à la rigueur, être évitées vers la surface, mais rien n'en affirmait ou n'en infirmait l'existence au delà de la portée de la vue, ce qui rendait douteuse la valeur trouvée ou calculée sur des données insuffisantes,

ou imparfaites pour la distance comprise entre le fond et la surface. Il fallait alors se contenter de tracer au-dessus du chiffre représentant le nombre de mètres ou de brasses filés, le trait horizontal signifiant « pas de fond ».

Aimé fit ses expériences en 1841. Opérant au large d'Alger, il n'avait affaire qu'à des profondeurs qu'on appellerait aujourd'hui très modérées, mais qui, étant donnée l'exiguité des ressources du pauvre professeur au lycée d'Alger, n'en étaient pas moins assez considérables, car il sonda jusqu'à 1 606 mètres. Il sut trouver une solution aux trois ou quatre grosses difficultés que comporte un sondage profond et devant lesquelles avaient échoué ses prédécesseurs et échouèrent beaucoup de ses successeurs. On est étonné du peu de notoriété obtenue par d'aussi remarquables travaux.

En apparence, rien de plus facile qu'un sondage; rien de plus difficile en réalité. Pour mesurer une petite profondeur, on prend une cordelette divisée en mètres, décamètres et hectomètres, par des chiffons de diverses couleurs; on y attache un poids, on immerge, on laisse filer; quand la corde cesse d'être entraînée, on compte le nombre de mètres immergés. Or, s'il s'agit d'une grande profondeur et qu'on opère de la même façon, jamais la cordelette ne s'arrêtera; elle ne cessera pas de descendre, on ne trouvera jamais le fond.

Cependant le fond existe et le plomb de sonde, comme tout corps lourd soumis à l'action de la pesanteur au sein de l'eau, doit descendre jusqu'à ce qu'il rencontre le sol ferme. La ligne de sonde, plus ou moins rugueuse, subit de la part de l'eau un frottement d'autant plus énergique que la surface frottante est plus grande, c'est-à-dire que la corde est filée sur plus de longueur. On dirait volontiers qu'il en est comme si, à mesure que descend la ligne, elle était retenue par un nombre de plus en plus considérable de mains invisibles, chacune très faible, mais que leur nombre, s'accroissant avec la distance, finit par rendre excessivement puissantes, de sorte qu'elles parviennent à équilibrer, puis à surmonter la tendance à la descente communiquée par le poids à la

corde. L'extrémité de cette dernière s'immobilise, tandis que le haut descend toujours entraîné par son propre poids ; la ligne se pelotonne sur elle-même entre deux eaux et l'on peut désormais en envoyer indéfiniment. Si, pour diminuer le frottement, on prend une corde de faible surface, c'est-à-dire fine, elle sera peu résistante ; chargée d'un faible poids elle s'arrêtera encore plus tôt et lestée d'un poids pesant, elle cassera. Si l'on choisit une corde ayant un diamètre suffisant pour soutenir le poids, sa surface augmentera, il en sera de même du frottement, malgré la surcharge, il y aura encore arrêt ou rupture. On se trouve donc en présence d'un véritable dilemme ; de quelque manière qu'on procède, grosse corde ou fine corde, poids très pesant ou peu pesant, on n'arrive pas au fond.

Ce n'est pas tout ; même à des profondeurs moyennes, on perçoit mal ou on ne perçoit pas le choc d'arrêt brusque indiquant la fin du sondage. Le poids repose sur le sol et comme rien n'en avertit, on continue à filer de la ligne.

Puis, sur son parcours, entre la surface et le fond, la ligne traverse des zones superposées de courants qui lui communiquent une courbure variée, ce qui augmente sa longueur et fausse par excès la profondeur déterminée.

Le bateau à bord duquel s'exécute le sondage demeure ou s'efforce de demeurer au même point de l'océan, néanmoins il monte et descend à la lame et communique des secousses brusques à la ligne. Celle-ci résiste à cause du frottement exercé par l'eau ; si les secousses sont trop fortes, elle casse.

Enfin, le point où s'effectue le sondage est fixé par une détermination astronomique exacte seulement à trois minutes d'angle près, c'est-à-dire trois milles environ. Quand on reportera le sondage sur une carte, au millionième par exemple, on ne sera en droit que d'affirmer qu'il se trouve quelque part sur un cercle ayant un diamètre de 5 555 mètres soit 5,5 mm. à l'échelle adoptée. Cette considération est importante ; elle règle l'échelle des cartes et démontre l'axiome trop souvent méconnu, que l'on n'augmente pas la précision d'une carte en augmentant son échelle.

Laissant de côté cette dernière difficulté qui semble inévitable

et dont l'amélioration, si elle est possible, dépend de l'astronomie et non de l'océanographie, il n'en reste pas moins quatre causes d'erreur à corriger : le frottement, la perception du choc contre le fond, les secousses du navire et la courbure de la ligne.

Aimé, qu'on ne saurait trop admirer, d'abord parce qu'il le mérite largement pour avoir été un véritable précurseur dans toutes les branches de l'océanographie, une gloire de l'Université de France qui ne se doute guère qu'il a existé, et ensuite parce que, ayant eu la maladresse d'être modeste, il est resté absolument ignoré après sa mort prématurée, résolut en même temps les quatre difficultés d'un sondage. Pour lignes, il prit des tresses de soie, très fortes, quoique très minces et très peu rugueuses ; d'un diamètre de 4 à 5 millimètres, elles pouvaient supporter sans se rompre un poids de 40 kilogrammes et on ne les chargeait que de 20 kilogrammes. Il en attachait plusieurs bout à bout, d'un diamètre de plus en plus fort, les plus solides étant les plus proches de la surface. Un dispositif permettait de se débarrasser à volonté du poids ajouté au moyen de l'envoi d'un messager qui le détachait. Afin d'avertir de l'arrêt contre le fond et d'amortir les secousses, un système de cordage roulant sur trois poulies et muni d'un autre poids, installé le long d'une vergue, servait de régulateur de tension. Enfin la finesse même de la ligne la faisait mieux résister aux courants sous-marins. Une petite cavité remplie de suif pratiquée à la base de l'appareil à échappement maintenant le poids pendant la descente rapportait un échantillon du sol et en même temps la complète certitude qu'on avait bien réellement atteint le fond.

N'est-il pas curieux de constater après tant de belles découvertes et bien d'autres encore faites par Aimé, après que ses procédés ont été décrits et figurés dans une publication officielle, les mémoires relatifs à l'*Exploration scientifique de l'Algérie*, imprimés à l'Imprimerie Royale en 1845, que le nom d'un savant d'un tel mérite soit aussi peu connu en France ? On dirait que l'océanographie porte chez nous malheur à qui s'en occupe. Les étrangers et principalement les Américains et les Anglais, des Français même,

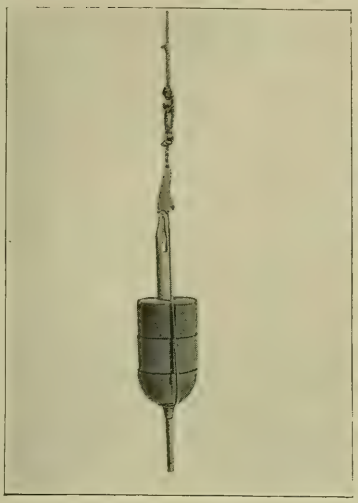
vont travailler pendant une trentaine d'années à redécouvrir ses inventions et quand, à force de labeur, on aura enfoncé des portes depuis si longtemps ouvertes, on en saura faire sortir une ample moisson de gloire, tandis que le pauvre Aimé mort à la peine, restera ignoré. Nous ne manquons pas d'hommes éminents, mais, pour le plus grand profit de la science et d'elles-mêmes, les autres nations savent soutenir ceux qu'elles possèdent.

La généralisation des procédés pratiques de sondage est due aux Américains. Le célèbre Maury se dévoua à cette œuvre et il trouva la solution complète du problème pour deux raisons : d'abord parce qu'il était résolu à la trouver et ensuite parce que rien ne lui fut refusé de ce qui était susceptible de contribuer à la réussite : concours de collaborateurs habiles et moyens matériels d'expérimenter les procédés imaginés. Nous sommes loin d'Aimé monté dans une embarcation prêtée presque par charité, fabriquant lui-même ses instruments, les manœuvrant de ses mains, faisant face à toutes les dépenses sur les économies réalisées sur son traitement annuel de 3 000 francs ! Maury consacra les années comprises entre 1850 et 1857 à dresser la liste de tous les sondages effectués en mer profonde et publia une carte bathymétrique de l'Océan Atlantique avec quatre teintes, par 1 000, 2 000, 3 000 et 4 000 brasses de profondeur. Appareils et méthodes donnèrent lieu à des essais en grand faits à la mer. Les lieutenants Lee et Berryman, de 1850 à 1853, étudièrent la variation de vitesse de descente d'une ligne de sonde et cherchèrent à évaluer la profondeur en notant l'instant où la vitesse se ralentissait après que le plomb avait touché le fond. On rechercha aussi quel était le poids le plus convenable pour entraîner la ligne et éviter sa courbure par les courants. On eut soin d'exécuter les sondages en embarcation afin de maintenir du mieux possible la verticalité de la ligne dont on ne pouvait guère s'assurer que pour les quelques brasses les plus voisines de la surface. Le lieutenant Walsh de l'*Albany* remplaça la corde en chanvre d'abord par une corde en soie, puis par un câble en fils métalliques qui donna de mauvais résultats et fut abandonné. Maury fit même construire par le mécanicien Baur, de New-York,

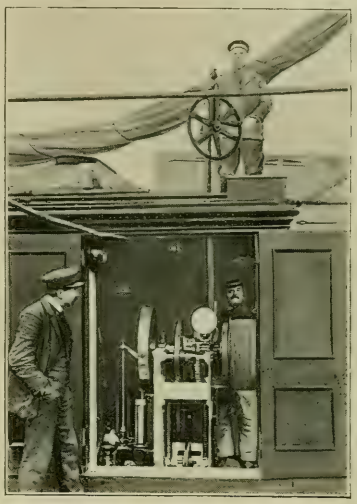
un sondeur à hélice dont les tours, pendant la descente, étaient enregistrés sur un compteur; mais l'appareil, bon pour les petites profondeurs, se montra insuffisant pour les grandes. On eut aussi l'idée, dans le but d'éviter de compter la longueur de la ligne filée, de la couper à la surface aussitôt que le plomb était parvenu au fond et de mesurer ce qui restait sur la bobine où on l'avait enroulée. La méthode fut trouvée inexacte, très coûteuse et peu pratique.

En 1854, à l'instigation de Maury, le midshispman Brooke fit sa découverte. Aimé se débarrassait de son poids arrivé au fond, à l'aide d'un messager envoyé de la surface, Brooke produisit la chute automatiquement d'une façon si simple qu'elle est impossible à perfectionner et sert encore aujourd'hui. Il lui suffit d'un déclic qui libérait le poids dès que celui-ci, heurtant le sol, mollissait une cordelette maintenant le déclic relevé. Ce perfectionnement à l'antique appareil de Cusanus, de Puehler et d'Alberti et à celui plus récent d'Aimé, eut une influence capitale sur l'art des sondages. Après de longs essais exécutés dans le Pacifique par le midshipman Mitchell, du *Dolphin*, on fut assuré d'atteindre toutes les profondeurs et comme on avait introduit à la base du plomb quelques tuyaux de plumes d'oie qui se remplissaient de la vase du fond, non seulement la remontée était rendue incomparablement moins pénible et plus prompte puisqu'on se bornait à hâler à bord une mince tige métallique, mais on possédait un échantillon du sol sous-marin intact et par conséquent susceptible d'être analysé et preuve certaine qu'on avait touché le fond.

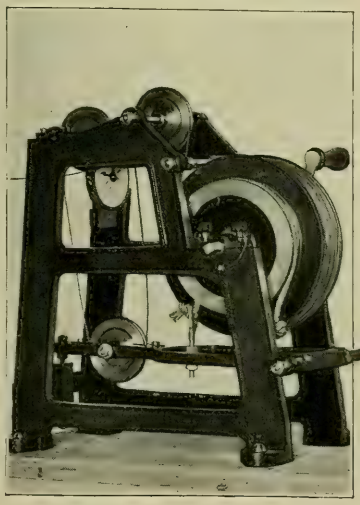
Dès ce moment, la marine américaine exécuta des sondages dans tous les océans : le *Dolphin* (1851) dans l'Atlantique nord, l'*Arctic* (1856) entre Terre-Neuve et l'Irlande, le *Gettysburg* (1876) dans l'Atlantique nord et (1878) dans la Méditerranée, l'*Essex* (1877) dans l'Atlantique sud, le *Saratoga*, l'*Argus*, le *Flamingo* et le *Wachusett* (1879) dans l'Atlantique nord, le *Blake* qui trouva en 1882 la plus grande profondeur de l'Atlantique nord par 8 341 mètres et travailla ensuite dans le golfe du Mexique, le *Tuscarora* (1873-1878) dans le Pacifique nord, l'*Higarita*, le *Ranger*, l'*Alert*, l'*Alaska* dans le Pacifique sud, l'*Entre-*



TUBE SONDEUR BUCHANAN



APPAREIL DE SONDAGE LE BLANC



APPAREIL DE SONDAGE BELLOC
A PETITES PROFONDEURS

THERMOMÈTRE NEGRETTI ET ZAMBRA

prise (1883) dans l'Océan Indien et d'autres encore. Les Américains furent vraiment les premiers à donner une notion sûre du relief sous-marin. Depuis eux, toutes les nations contribuèrent à perfectionner une œuvre qui exigera de nombreuses années pour être complétée, car l'océan est vaste et chaque coup de sonde ne garantit qu'un seul point de son immensité. Les Allemands avec la *Gazelle* (1874-1876), l'*Élisabeth* (1876-1878) et plus tard le *National*, la *Valdivia* et le *Gauss* en ce moment même en cours de navigation dans les régions antarctiques, les Anglais avec le *Lightning*, le *Porcupine* et le *Challenger*, les Autrichiens avec la *Pola*, les Danois, les Norvégiens, les Suédois, les Hollandais, les Russes et les Français dont, à vrai dire, les expéditions dans l'Atlantique nord avec le *Travailleur* et le *Talisman* furent plutôt zoologiques qu'océanographiques.

On avait imaginé pour mesurer la profondeur une foule d'autres appareils médiocres ou franchement mauvais. Le sondeur de Massey était un enregistreur à mouvement d'horlogerie, celui d'Ericsson était basé sur une idée juste et ingénieuse, la réduction progressive d'après la loi de Mariotte, d'un volume limité d'air descendu au milieu des eaux. On essaya jusqu'à des bombes éclatant en touchant le sol. Ces appareils étaient coûteux et fonctionnaient mal ; les mouvements d'horlogerie immergés se détraquent ; les autres donnaient des indications fausses, les explosions des bombes étaient dangereuses ou impossibles à percevoir. Deux seulement méritent d'être mentionnés avec plus de détails, le sondeur de Sir William Thomson et le bathomètre de Siemens.

Le sondeur Thomson est un excellent instrument. Il ne peut pas servir à tout, mais il a subi l'épreuve de la pratique, est très employé et rend de précieux services lorsqu'on ne lui demande que ce qu'il est susceptible de donner.

Sa construction est fondée, en premier lieu, sur l'emploi, à la place d'une ligne de chanvre ou de soie, ou encore du câble métallique du lieutenant Walsh, d'un fil d'acier dit corde à piano, en même temps très solide, ce qui lui permet de supporter un poids très lourd, de surface lisse ce qui atténue le frottement presque

jusqu'à l'annuler, et très fin ce qui lui fait couper l'eau et éviter les courbures dues aux courants.

L'autre principe de sa construction est que la profondeur est mesurée non par la longueur de la ligne filée, mais, comme Ericsson en avait eu l'idée, par la réduction d'un volume d'air limité soumis à des pressions de plus en plus grandes à mesure que la profondeur augmente. Un tube de verre long et presque capillaire, bouché à l'une de ses extrémités, ouvert à l'autre, est enduit intérieurement d'une solution de chromate d'argent rouge quand elle est sèche, jaune quand elle a été mouillée. On fixe le tube convenablement protégé à un poids en plomb attaché au fil d'acier par un bout de corde, on envoie à la mer, le tube descend, le volume d'air confiné qu'il contient diminue régulièrement et le niveau de l'eau s'élève dans son intérieur. On n'a plus, après la remontée, qu'a mesurer la hauteur du chromate décoloré et par conséquent la hauteur restée colorée pour connaître la réduction subie par l'air d'après la loi de Mariotte et par conséquent la profondeur.

Le sondeur Thomson n'est pas sans inconvénients. Le fil d'acier se rouille si on ne prend pas beaucoup de soins pour l'en empêcher en l'essuyant après chaque opération et en le conservant dans une caisse remplie d'eau de chaux ; il forme aisément des coques qui, sans que rien permette de le soupçonner, affaiblissent des trois quarts sa force portante et occasionnent des ruptures ; la précision des indications diminue à mesure que la profondeur augmente, parce qu'une même diminution de volume d'air confiné correspond à une distance verticale de plus en plus grande ; les secousses donnent à la surface de l'eau dans l'intérieur de ce tube une disposition inclinée qui se communique au chromate et rend incertaine l'appréciation de la longueur décolorée. Cependant l'instrument est bon dans les petites profondeurs et comme il permet de sonder en marchant à moyenne vitesse, il est très employé à bord des navires à vapeur pour les atterrissages qu'il facilite beaucoup.

Un instrument extrêmement ingénieux et qui rendrait d'immenses services s'il était amené à ses derniers perfectionnements et rendu

d'un usage pratique, est le bathomètre Siemens. Sa construction s'appuie sur un principe original et parfaitement logique.

Le poids d'un corps est l'effort exercé par ce corps sur un obstacle qui l'empêche de se rendre au centre de la terre et cet effort est proportionnel à la masse du globe comprise entre le point de la surface terrestre où se trouve le corps et le centre de la terre. Or, pour un bâtiment, cette masse du globe est constituée par deux colonnes de matière superposées, la première, la colonne d'eau entre la surface et le fond de la mer au point considéré, possède la densité 1, environ, la seconde solide, entre le fond de la mer et le centre de la terre, a pour densité la densité moyenne de la terre qui est 5,5 environ. Si on promène sur tous les océans un même obstacle offrant partout le même résistance, chargé d'un même corps pesant, ce dernier exercera un effort proportionnel à la densité de la colonne de matière hétérogène qui la sépare du centre de la terre et par conséquent à la colonne d'eau comprise entre la surface et le fond, en d'autres termes à la profondeur de la mer. L'effort sera variable en chaque point de l'océan et sa variation, proportionnelle à celle de la profondeur de la mer, servira de mesure à celle-ci.

Siemens a pris pour obstacle une lame de tôle ondulée, pour matière pesante une masse de mercure reposant sur la tôle, pour mesure de la variation d'effort le déplacement de l'extrémité supérieure de la colonne mercurielle dans un tube de verre fin enroulé horizontalement en spirale afin de rendre ses variations de longueur bien visibles.

L'instrument ayant à enregistrer des indications assez faibles est délicat à construire. Il a l'inconvénient de mesurer des chiffres très forts, des centaines et des milliers de mètres par des déplacements très faibles, des millimètres, et par suite d'être sous la puissante influence des causes extérieures, température d'abord, puis état physique moléculaire de l'instrument lui-même. La résistance de la lame de tôle ondulée supposée absolument constante, ne peut pratiquement être considérée comme telle ; le bathomètre ne donne pas exactement la profondeur de l'eau immédiatement au-dessous du bateau qui la porte, mais la profondeur moyenne de la

mer dans un certain rayon d'influence autour de la projection verticale du navire ; enfin son maniement est et ne peut être qu'extrêmement délicat. Ces multiples difficultés ont été telles que jusqu'à présent, l'instrument n'a jamais été manié que par son inventeur et quoiqu'il ait donné, dit-on, de bons résultats entre ses mains, son usage n'a pas été continué.

Et cependant, quels immenses services ne serait-il pas susceptible de rendre ! Toute personne naviguant, sans aide, sans installation coûteuse et exigeant une place considérable, sans arrêter le bâtiment, tranquille dans sa cabine, se bornant à noter l'heure de l'observation et la longueur d'une colonne mercurielle, dresserait la section de l'océan le long de la projection de la route suivie. Les médecins de paquebots qui possèdent des loisirs et ont l'habitude des opérations délicates, pourraient s'en charger sur le parcours des principales lignes de navigation. Le même trajet étudié plusieurs fois, permettrait d'établir des moyennes de moyennes et par conséquent de supprimer à peu près entièrement les erreurs accidentelles. Il jouerait alors le rôle de ces nivellements de lignes de chemins de fer dont l'exactitude est certaine et auxquels se raccorde tout un réseau de nivellements secondaires. La rapidité de la marche n'étant pas un obstacle et l'identité du trajet étant un avantage, en peu d'années la carte bathymétrique de l'océan serait exécutée sur le globe entier et l'on posséderait la base indispensable de toute la science océanographique.

De si beaux résultats sont faits pour encourager ceux qui cherchent à reprendre l'instrument de Siemens et à simplifier sa construction et son maniement. Un savant s'est intéressé à la question et s'en occupe avec ardeur sans se laisser décourager par les difficultés de détail qui sont nombreuses. Puisse-t-il réussir ! Son succès aurait une réelle portée et serait un service signalé rendu à l'océanographie dont les progrès touchent à tant d'intérêts de science pure et d'applications industrielles.

En attendant, on étudie le relief du sol sous-marin d'une façon bien autrement lente. Les procédés varient selon qu'il s'agit du levé hydrographique de portions voisines du rivage ou du levé

en haute mer, hors de la vue de terre. Étudions d'abord le mode de travail des ingénieurs hydrographes.

Supposons qu'il s'agisse d'un terrain immédiatement contigu à la terre par des fonds inférieurs à 15 ou 20 mètres, où les navires à vapeur à bord desquels s'exécutent les levés en eaux plus profondes ne sauraient passer sans danger. L'ingénieur est sur une baleinière manœuvrée par quatre rameurs. A l'avant, sur une petite plate-forme de fortune, un matelot sondeur revêtu d'un ciré, car sa besogne ne tardera pas à le rendre ruisselant d'eau, tenant à la main une ligne de sonde en chanvre portant à son extrémité un plomb en forme de pyramide hexagonale ou octogonale allongée, du poids de cinq ou six kilogrammes et muni à sa base d'une cavité qu'on remplit de suif. A l'arrière, dans la chambre de l'embarcation, l'ingénieur, debout, tenant son cercle répétiteur et à côté de lui son secrétaire, matelot timonier, avec son carnet et son crayon ; à l'extrême arrière de l'embarcation, assis sur le bord, le patron chargé de gouverner.

L'embarcation partant de terre suit une direction droite indiquée par l'ingénieur et soigneusement maintenue par le patron, les canotiers rament régulièrement et lentement. Après un nombre déterminé de coups d'avirons, dix par exemple, sauf circonstances particulières, le matelot sondeur balance son plomb de sonde, le fait osciller comme un pendule d'avant en arrière et d'arrière en avant et quand l'impulsion est assez forte, il le lance en avant. Le plomb tombe à l'eau, le sondeur laisse filer la ligne entre ses doigts tandis que la baleinière où l'on a cessé de ramer, avance poussée par son impulsion et sa vitesse est telle que son avant, pendant que le plomb descend verticalement, est arrivé juste au-dessus du point où il repose sur le sol, car la profondeur de l'eau est faible. La ligne qui préalablement a été rigoureusement mesurée mouillée et porte de mètre en mètre des marques représentées par des chiffons de couleurs différentes pour les décamètres, les mètres, et quelquefois les demi-mètres, est verticale. Le sondeur soulève légèrement pour éviter toute courbure, laisse retomber sur le fond et crie à haute voix la profondeur aussitôt ins-

crite par le secrétaire ; puis il s'occupe à remonter son plomb.

Pendant ce temps, l'hydrographe mesure avec son cercle les deux angles sous lesquels, du point où il se trouve, sont aperçus trois points remarquables situés à terre et soigneusement repérés sur la carte, clochers, pointes de rochers de forme particulière, phares ou autres amers. On mesure pour servir de vérification ultérieure, plus de deux angles, souvent cinq ou six, mais en réalité deux suffisent pour fixer d'après la construction de géométrie élémentaire appelée segment capable d'un angle donné, la position du point de sondage par rapport aux repères à terre. L'ingénieur fait à haute voix la lecture des angles qu'il a trouvés et ils sont immédiatement inscrits par le secrétaire. Ce dernier ajoute à ses indications la nature du fond criée par le sondeur qui, ayant fini de ramener son plomb, a pu examiner à sa base, les fragments de coquilles, les grains de sable, les herbes marines ou les petits morceaux de vase restés collés au suif qui garnit la cavité.

La station est complète. Le sondeur renouvelle le suif, les canotiers reprennent leur marche régulière ; dix ou vingt coups d'aviron plus loin, on fait une nouvelle station et ainsi de suite. Lorsqu'une ligne est achevée, on en commence une autre. Le temps nécessaire pour une station est beaucoup moins long qu'on ne serait porté à le croire, chacun exécutant en même temps une besogne rigoureusement définie, toujours la même et aucune interruption n'ayant lieu.

Le procédé peut être simplifié et considérablement accéléré par l'emploi d'un instrument nouveau qui, installé à terre en un point dominant, permet par une seule visée d'obtenir les coordonnées topographiques de l'endroit où s'arrête l'embarcation à bord de laquelle l'unique préoccupation consiste à mesurer la profondeur de la mer sans se préoccuper en rien du repérage de la position.

En mer plus profonde, les opérations sont essentiellement les mêmes ; l'ingénieur et son secrétaire sont sur la passerelle, les coups d'aviron sont remplacés par des tours d'hélice, le sondeur est debout sur une petite plate-forme extérieure au bâtiment et proche de l'arrière ; le plomb de la ligne de sonde est remonté

jusqu'à la vergue du mât de misaine et tombe à l'eau à volonté par le simple mouvement d'une corde manœuvrée du pont. Le matelot sondeur soulève la ligne aussitôt que le fond est touché, la tient bien verticale, chante la profondeur et le plomb est remonté par un petit treuil à vapeur ou électrique.

On crible ainsi la surface blanche de la carte marine d'une multitude de coups de sonde ayant chacun leur cote corrigée s'il y a lieu, de l'effet de la marée calculé d'après l'heure de l'opération et les indications d'un marégraphe au même moment. Pour les hydrographes, la mer ne commence qu'au niveau des plus basses eaux. Rien n'est plus simple que de tracer ensuite sur la carte les courbes isobathes entourant les fonds de même profondeur.

Pendant ce temps, car pour procéder plus rapidement, toutes ces opérations sont simultanées, un troisième ingénieur chargé de la topographie, suit la côte en embarcation, presque à toucher terre. A chaque instant il débarque, monte sur les rochers, les falaises, présentant le moindre caractère remarquable, s'arrête sur les pointes, au fond des criques, aux extrémités des plages et là, muni de son cercle, il repère le point où il se trouve et entre deux de ces points il dessine ce qu'on pourrait appeler le portrait d'après nature du rivage.

Certains endroits exigent une attention particulière, ceux qui sont susceptibles d'être un danger pour la navigation comme par exemple les alentours des écueils isolés et surtout les têtes de roches cachées sous les eaux et ne découvrant jamais. On multiplie les sondages autour de ces points, le réseau se fait de plus en plus serré afin de connaître exactement la hauteur jusqu'où s'élève la pointe et sa position exacte, plus qu'exacte s'il est possible, afin qu'ainsi qu'il est arrivé malheureusement trop souvent, un bâtiment ignorant du péril ne vienne, marchant à pleine vitesse, éventrer sa coque contre l'écueil. On se sert aussi, lorsque les circonstances le permettent, d'une drague à courant, longue corde immergée à une profondeur déterminée, maintenue horizontale et portant de distance en distance des grappins. La corde est soutenue à la surface par des bouées et ses extrémités sont tendues en ligne

droite chacune par une embarcation. On abandonne au courant et la drague, balayant un plan situé par exemple à cinq ou dix mètres de profondeur, garantira qu'aucune roche ne dépasse ce niveau. En effet, s'il en existe une, elle arrêtera la corde immergée et les deux bouées extrêmes de la surface continuant leur marche, décriront forcément une courbe pour venir se réunir en aval, s'immobiliser à leur tour et se placer en ligne droite avec la tête de roche. Il est alors facile de trouver sa position, de la fixer par rapport à des repères situés à terre et d'en prendre des alignements.

En écrivant ces lignes, ma pensée se reporte à l'époque déjà lointaine où j'apprenais moi-même les choses que je viens de décrire, à bord du *Laborieux*, dans l'Iroise, en suivant les opérations d'un ingénieur hydrographe de la marine, dont j'admirais la science et la haute habileté professionnelle autant que j'appréciais son affectueuse cordialité; d'un autre dont je restai le compagnon pendant plusieurs semaines; d'un troisième qui débutait alors dans la carrière et qui communiquait à ceux qui l'entouraient l'enthousiasme pour la mer dont il était rempli. Les deux saisons pendant lesquelles j'eus l'honneur de partager leur vie m'ont laissé de précieux souvenirs. Nos ports d'attache étaient Camaret et le Conquet. Lorsque le temps était favorable, on partait de grand matin et l'on se rendait au travail. Je suivais tantôt l'un, tantôt l'autre, pour bien me rendre compte des procédés employés. Parfois, j'accompagnais le topographe, escaladant avec lui les rochers de cette côte si pittoresque. Quand ils étaient trop abrupts, on les longeait en baleinière, à les toucher; on les examinait jusque dans leurs moindres recoins. On découvrait alors autour d'eux d'adorables grottes minuscules bordées d'une petite grève de sable fin ayant la teinte gris satiné des perles fines avec des paillettes de mica ressemblant à de la poussière de diamant. Chaque flot venait les battre en formant des remous à leurs extrémités et le regard se perdait dans des trous profonds où la mer prenait la couleur azurée du lapis ou le bleu sombre un peu violacé du saphir et que les reflets du soleil sillonnaient d'éclairs incessants. Les parois

humides étaient tapissées d'algues brunes, rosées et verdâtres et quand l'onde qui les avait baignées se retirait, l'eau en ruisselait par des milliers de colonnettes d'argent. Oubliant pour un instant les angles et la topographie, je me laissais aller à penser que les pages de la fée Titania étaient bien heureux de pouvoir, tous seuls, — « petits comme de petits atomes », — se baigner dans cette eau si pure, courir dans ces forêts d'algues fraîches et, pour se reposer, s'étendre dans la conque d'une coquille rose, regarder le ciel et la mer, suivre de l'œil les scintillements de l'eau sans penser à rien. D'autres fois, on s'occupait de l'hydrographie des petits fonds et, sous le soleil ardent, j'écoutais les coups d'avirons dont le rythme régulier se communiquait à mon corps s'inclinant à la poussée que chacun d'eux imprimait à la baleinière. Je regardais à travers le cristal limpide sur lequel l'embarcation flottait comme sur de l'air, les touffes de laminaires rubanées ressemblant à d'immenses serpents à la peau sombre. D'autres fois encore, plus au large, du haut de la passerelle du *Laborieux*, je voyais défiler les cailloux, les rochers noirs, alors tout brillants de soleil et aussi paisibles que de grands fauves au repos. J'évoquais leur image alors que par les nuits d'hiver, ils devaient être si terribles, balayés par les vagues affolées, couverts d'écume et d'embruns, dans les hurlements du vent et les rafales de pluie. Mais on était en été, la mer était calme, roulant ses lames de houle à surface moirée. Tout à coup une large tache apparaissait bouillonnante, faite du frétillement de millions et de millions de sardines poursuivies par des bandes de marsouins et, dans l'air, par des nuées d'oiseaux, les uns bondissant hors de l'eau, la frappant de leur queue pour masser les sardines et en avaler davantage, les autres voletant, piaillant, se posant sur la mer, attablés, piquant du bec à droite et à gauche gloutonnement, goëlands gris, cormorans noirs, âpres à la curée presque autant que des hommes, avec seulement le respect humain en moins. On descendait aussi à terre, dans des endroits sauvages, à Molène, à Quémenez, à Ouessant, à l'île de Sein, nue, grandiose, battue par le vent, plus riche de poésie que de brins d'herbe. Le soir, en regagnant le mouillage,

on regardait s'allumer les feux, tous en même temps, si nombreux que la côte en était illuminée : Armen, les Pierres-Noires solitaires, le Stiff, Saint-Mathieu blanc malgré la nuit, avec la masse noire de l'abbaye à ses pieds, Kermorvan, les feux de Brest. On avait travaillé, on se sentait fatigué mais enivré d'air et d'espace et lorsque, la nuit, on s'étendait sur son lit et que bercé par le mouvement du bateau, écoutant le bruit monotone du flot glissant le long du bord ou clapotant contre les flancs du navire, tout près de soi, ou bien encore les grincements de la chaîne de l'ancre sur l'écubier, on avait conscience qu'on avait bien employé sa journée, qu'on avait réellement vécu, qu'on avait fait provision de souvenirs salubres et l'on s'endormait tout plein d'une grande paix.

Les ingénieurs hydrographes ne travaillent guère qu'en vue de terre, à une profondeur dont l'extrême limite ne dépasse jamais une centaine de mètres et est le plus souvent notablement moindre. Leur tâche consiste à faciliter la navigation et les faibles profondeurs offrent seules un intérêt pour les atterrissages. Les sondages océanographiques qui se font à d'énormes profondeurs, jusque vers 10 000 mètres, jusqu'aux véritables abîmes de l'océan, s'exécutent d'une façon différente quoique les principes restent les mêmes.

Les bâtiments destinés à des missions océanographiques en mer profonde doivent être spécialement installés pour ce service. On n'improvise pas plus ce genre d'études qu'on n'improvise un laboratoire et des savants spécialistes. L'observation paraît évidente, et cependant la majeure partie des échecs provient de ce qu'il n'en a pas été tenu compte. Le gros travail est exécuté par la vapeur, car les bras humains se fatigueraient vite à remonter de lourds plombs de sonde et si, à force de courage et d'endurance, ils y parvenaient, ils y consacreraient un temps beaucoup trop considérable. Il faudrait néanmoins se garder d'exagérer les difficultés. La zoologie marine seule a besoin d'appareils véritablement coûteux, encombrants et pénibles à manœuvrer. L'océanographie pure est incomparablement moins exigeante et quoique rien ne se fasse de rien, il est possible d'accomplir de très importantes décou-

vertes, de rendre des services signalés à la science sans être obligé d'y consacrer d'énormes sommes d'argent et des années d'études préalables. Nous allons parler ici des recherches océanographiques en haute mer.

L'appareil de sondage dont il existe plusieurs modèles, reste toujours le même dans ses parties essentielles. Le fil de sonde constitué le plus souvent par un câble de trois brins dont chacun est de trois fils d'acier est, sur une longueur d'une dizaine de milliers de mètres, enroulé sur une solide bobine. Ce câble que nous continuerons à désigner comme on en a l'habitude sous le nom de fil, court sur plusieurs poulies qui régularisent son mouvement et, la machine à sonder étant le plus souvent installée au milieu du pont, près de l'axe du bateau, il traverse transversalement le pont à une certaine hauteur afin de ne pas gêner la circulation. Sur son trajet, il passe sur une poulie compteur de tours, faisant partie de la machine elle-même, engrenant avec une vis sans fin mettant en mouvement une aiguille indicatrice. Depuis le moment où le fil est mis à l'eau jusqu'à celui où le plomb touche le fond, l'aiguille du compteur avance lentement et quand elle s'arrête, elle marque en mètres, sur un cadran, la valeur de la profondeur.

Le fil en sortant de la machine est amené au-dessus d'une plate-forme extérieure au bâtiment et sur laquelle se tiennent les hommes chargés de la manœuvre. Une dernière poulie lui fait prendre la direction verticale exactement au-dessus d'une ouverture quadrangulaire ménagée au milieu de la plate-forme donnant sur l'eau et dont les quatre côtés sont garnis de cylindres d'acier roulant très aisément au milieu de leur axe et sur lesquels vient frotter le fil, pendant la descente ou la remontée, selon les mouvements de roulis et de tangage du navire.

Au commencement du fil, on attache quelques brasses de corde pour donner plus de mou et, à l'extrémité de la corde, le plomb de sonde dont le modèle est assez varié. Le plus généralement employé est celui de Buchanan constitué par un tube long de 80 centimètres à 1 mètre, qui heurte verticalement le fond, s'y

remplit de vase et la rapporte à bord où elle sera soigneusement recueillie pour être analysée plus tard. Autour du tube, on enfile la série de poids en fonte, en rondelles successives, maintenues par un simple fil de fer, destinés à entraîner le fil au fond. Détachés automatiquement par le choc, ils seront perdus ou bien, si on le préfère, ils resteront attachés et devront alors être remontés à la surface. Le travail sera plus pénible pour des hommes ; s'il est exécuté par la vapeur, il n'en résultera qu'un peu de lenteur et l'on aura économisé les poids.

Au-dessus du sondeur, on fixe ordinairement une bouteille à recueillir l'eau qui se ferme par l'envoi d'un messager depuis la surface. Au-dessus ou même fixé à la bouteille est un thermomètre dans sa monture dont le messager provoquera le retournement, immobilisant d'une manière définitive la colonne mercurielle et permettant ainsi de lire à bord sa longueur, c'est-à-dire la température du fond non influencée par les couches plus chaudes ou plus froides qu'aurait rencontrées l'instrument sur son double trajet de descente et de remontée.

On envoie doucement à l'eau. Un frein faisant partie de la machine à sonder permet de ralentir ou d'accélérer le mouvement de descente. A intervalles convenables, on arrête, et les hommes sur la plate-forme attachent au fil les bouteilles et les thermomètres destinés à récolter l'eau et à donner la température aux diverses profondeurs. L'instrument attaché, on soulage le frein, le fil continue à descendre. Pendant ce temps, le commandant, l'œil fixé sur le fil plongé dans l'eau et dont l'image ondoyante se perd dans les gouffres bleus mouchetés de petites bulles d'air brillantes comme des étincelles d'argent et qui viennent bouillonner à la surface, met tous ses soins à lui conserver la verticalité par l'action combinée du gouvernail et par la marche plus ou moins accélérée de l'hélice, en avant et en arrière. A cet effet, un double tuyau acoustique communique avec la machine et avec la passerelle où se tient l'homme à la barre.

Enfin le plomb touche le fond. On en est averti par un mollissement brusque du fil accentué par la détente des ressorts qui le

soutiennent et aussi par l'arrêt sur le cadran de l'aiguille indicatrice. On relève quelque peu le plomb, on le laisse retomber pour être assuré qu'il est bien au fond et on lit la profondeur. Au même moment, l'officier chargé de ce soin fait le point et détermine astronomiquement la position du sondage.

On introduit le fil dans la portion centrale vide du messager de Rung qui doit déclencher tous les thermomètres et fermer les bouteilles. On a calculé le temps qui lui est nécessaire pour faire le trajet et qui dépasse souvent une demi-heure. Aussitôt que l'on est sûr que l'opération est terminée, on remonte lentement. Le fil passe entre les mains de deux hommes qui l'essuient avec des chiffons et le graissent pour éviter la rouille et il revient s'enrouler sur le treuil. Le sondage est achevé, l'opération a duré quelquefois plus de deux heures. A mesure qu'apparaît un thermomètre ou une bouteille, la remontée s'arrête, les hommes sur la plate-forme décrochent le thermomètre et le passent à ceux qui en font la lecture; les bouteilles sont vidées dans des flacons soigneusement étiquetés et quand arrive le plomb, le tube contenant l'échantillon du fond est vidé à l'aide d'un mandrin en bois et le boudin vaseux mou, long d'une cinquantaine de centimètres, parfois davantage, est détaché, séché, enveloppé et conservé pour être analysé.

On possède de petits sondeurs plus simples et assez légers pour être placés et manœuvrés aisément même à bord d'une embarcation. Celui de M. Belloc suffisamment simplifié est excellent. Il est construit d'après les mêmes principes que les grands sondeurs. Un fil d'acier ou câble très fin enroulé sur un tambour passe sur un système de poulies dont la dernière actionne un compteur de tours à cadran où s'inscrit la profondeur. Un ressort se détendant brusquement dès que le poids touche le fond, permet de constater que le fond est réellement atteint; un frein qui n'est qu'un bout de corde laisse régler à volonté la vitesse de descente, enfin une double manivelle sert à remonter le fil à la main. L'opération est un peu plus longue, mais il y aurait folie à faire servir cet instrument à mesurer de fortes profondeurs et l'on ne saurait sans danger charger le fil outre mesure. En guise de lest, on prend quelquefois

un sac de pierres qui ne coûtent que la peine de les ramasser et que l'on abandonne au fond à chaque coup de sonde. Tel qu'il est, grâce à sa simplicité, sa facilité de manœuvre, sa légèreté et son bon marché, il serait fort à désirer que l'usage de ce sondeur fut répandu surtout parmi les yachtsmen. La vraie dépense en océanographie est le bateau et non les instruments. En ne l'appliquant qu'à des profondeurs inférieures à 500 mètres, ceux qui ont le bonheur de se livrer à la navigation de plaisance n'auraient à craindre ni un travail trop pénible ni une trop grosse perte de temps. Il servirait à des travaux extrêmement intéressants. On ne soupçonne pas les merveilleuses découvertes à faire sous l'eau. La découverte de ces mystères rendrait d'incalculables services à la science et, du même coup, à toutes les applications de l'océanographie, à la pêche dont vivent et dont meurent ces pauvres de la mer dont on ignore trop le courage, l'abnégation et la misère.

Le prince de Monaco a descendu en plein océan, au-dessous de 6 000 mètres, des nasses reliées par un câble en fils d'acier à une bouée et qui, demeurant plusieurs jours en place, sont non seulement des engins de pêche, mais constituent par leur immobilité au milieu de l'océan, une station fixe autour de laquelle on peut se livrer à des expériences et à des mesures dont la position est ainsi rendue certaine. En vue de la côte, au moyen de repères terrestres, rien n'est plus facile que de déterminer sa position ou de se maintenir dans une position choisie. On pourrait employer le même système pour établir une station permanente hors de vue de terre. Il suffirait d'immerger un sac de pierres qu'on relierait par un fil d'acier à un radeau portant un signal, pavillon pendant le jour ou fanal pendant la nuit; le tout, n'ayant aucune valeur, serait ensuite abandonné. Je recommande cette solution à un problème important de l'océanographie qui a été résolu d'une façon beaucoup plus pénible et plus coûteuse par les officiers de la marine américaine dans leurs études le long du Gulf-Stream.

Quoi qu'il en soit, les sondages étant exécutés, on les reporte sur une carte; on trace ainsi qu'il a été dit, les courbes isobathes en entourant par une ligne tous les points de même cote et on termine

en y passant un lavis bleu par teintes plates d'autant plus foncées que les aires qu'elles recouvrent sont plus profondes. Les distances verticales sont mesurées par les Anglais en brasses ou fathoms de $1^m,86$ qui ont l'avantage d'être la millième partie du mille marin de 1852 mètres, lequel correspond à la longueur d'un arc de une minute mesuré sur un grand cercle de la sphère terrestre. Cependant l'adoption du mètre et, d'une façon générale, du système métrique, offre de tels avantages que le Congrès International de Stockholm en 1899 et celui de Christiania en 1901, dont faisaient partie la plupart des nations maritimes de l'Europe, sauf la France, a sagement décidé que cette mesure serait exclusivement employée pour les profondeurs. Il restera cependant loisible de traduire les longueurs métriques en brasses de sorte que les aires isobathes se feront toujours par nombres ronds de mètres. Nous nous conformerons à cette règle.

Les mêmes congrès ont adopté le méridien de Greenwich comme méridien origine. Cette décision est aussi très sage : toutes les marines, sauf en France, l'ont admise. On se trouve en présence d'une masse si énorme de travaux basés sur cette donnée, d'un nombre si minime de travaux basés sur le méridien de Paris que l'avantage de la science est incontestablement en faveur de Greenwich.

La science a l'impérieux besoin de posséder le plus tôt possible une carte générale des profondeurs de l'océan. Il en existe plusieurs, mais il en faudrait une servant de type, admise par toutes les nations dont les travaux communs auraient servi à la dresser. J'ai établi dans un travail spécial que cette entreprise était beaucoup moins compliquée qu'on ne serait tenté de se l'imaginer et qu'il suffirait pour établir ce document indispensable, le tenir continuellement au courant des nouvelles découvertes et en publier des éditions de plus en plus parfaites, de deux ou trois personnes se consacrant entièrement à cette besogne.

A la suite du Congrès international géographique de Berlin en 1899, il fut décidé qu'une Commission étudierait les mesures à prendre pour l'établissement d'une carte générale bathymétrique

des océans et fixerait la terminologie sous-marine en allemand, en français et en anglais. Cette commission, réunie à Wiesbaden en mai 1903, a décidé la confection d'une carte au 1/10 000 000, en 24 feuilles dont 16 en projection de Mercator et 8 polaires en projection gnomonique et le prince de Monaco qui présidait, a généreusement consenti à se charger de faire exécuter le travail.

Il résulte, de l'ensemble de cet exposé des progrès accomplis dans l'art des sondages que, de quelque façon que soient recueillies les données numériques, soit par un instrument automatique comme le bathomètre qu'il sera en outre nécessaire de rendre enregistreur, soit à coups de sonde dont chacun ne fournit qu'un seul point, les procédés employés sont certains et la confection d'une carte bathymétrique générale complète et précise des océans n'est qu'une affaire de temps. Ce document est indispensable aussi bien au point de vue théorique qu'au point de vue pratique. Il doit être la base de tous les autres travaux d'océanographie, lithologie, chimie ou physique sous-marines. Les bâtiments télégraphistes contribueront beaucoup au prompt achèvement de cette œuvre. Les services qu'ils ont rendus à la topographie sous-marine sont déjà considérables. On leur doit de nombreuses déterminations de profondeurs le long de certaines lignes et surtout autour des points d'atterrissage des câbles; ils ne peuvent qu'en rendre davantage encore, alors surtout que la masse des données obtenues permettra de ne plus tenir aussi secrètes des informations qui aujourd'hui représentent une valeur industrielle et par suite, ne sont pas aussi divulguées que le souhaiteraient ceux dont l'unique préoccupation est le progrès scientifique. On a calculé que chaque année, il se donne environ un millier de coups de sonde profonds. En les rassemblant systématiquement, on ne sera pas longtemps à achever la carte des itinéraires les plus fréquentés, et quant au reste des mers du globe, il faut compter sur le sentiment si humain qui porte à boucher les trous dont la vue heurte les yeux. C'est l'effet que produira une carte volontiers trop complète dans certaines régions et trop dégarnie dans d'autres. L'important est de se hâter et de mettre en ordre les richesses

conquises, d'en tirer parti et d'y ajouter de nouvelles richesses. La carte bathymétrique des océans est un document qui tendra de plus en plus vers la perfection à mesure qu'on en fera des éditions successives mais qui, en réalité, ne sera jamais achevé. La mer couvre plus des trois quarts de la surface totale du globe et s'il a fallu tant d'efforts et de temps pour obtenir une représentation à peu près correcte d'une portion relativement minime de l'aire continentale, il en faudra bien davantage pour obtenir celle du fond océanique. D'ailleurs le travail en est incomparablement plus long et plus pénible parce qu'à l'air on voit à une certaine distance, tandis que sous les eaux, le coup de sonde ne renseigne que sur le point unique touché par le plomb et n'indique rien de ce qui peut exister même à quelques décimètres de distance. Le travail sous-marin est une besogne d'aveugle procédant à tâtons. Si la vie d'un homme est courte, la science est maîtresse du temps; comme nous avons perfectionné l'œuvre de nos prédécesseurs, nos successeurs perfectionneront celle que nous avons accomplie. Même imparfaites, les cartes bathymétriques rendront de tels services que leur confection devient un impérieux besoin et l'on ne saurait trop se féliciter de la généreuse initiative du prince de Monaco de faire exécuter dès maintenant les 24 feuilles au 1/10 000 000e de l'atlas bathymétrique général des mers du globe.

CHAPITRE II

LA MER, SES RIVAGES, SES PROFONDEURS
LE FOND DE SON LIT

Le seul moyen d'obtenir une idée générale précise de la forme du bassin océanique, de ses rivages, de la disposition de son lit, consiste à prendre des cartes géographiques ou bathymétriques, à les examiner avec attention, à se mettre, comme l'on dit, dans l'œil, les contours des continents, les dentelures des côtes, les colorations bleues plus ou moins intenses de la bathymétrie et à avoir cet ensemble tellement présent à la mémoire que lorsqu'on doit y penser, il ne cesse point de rester sous les yeux. de sorte qu'en parlant, en réalité on lise. La considération muette d'une carte, d'un dessin ou d'un schéma en apprend plus en quelques minutes que la lecture des interminables et indigestes descriptions des auteurs accoutumés à ce genre d'éloquence. Celui qui ne craint pas de publier des mémoires longs et pesants n'a besoin que d'y introduire une dose suffisante de termes techniques, de noms propres, d'infimes détails et il passe pour un profond génie. On se laisse duper aisément par les volumes épais. Combien sont considérés puits de science qui lorsqu'on examine de plus près leurs travaux se transforment en simples farceurs du genre sérieux. La géographie physique est la science des cartes, des dessins à défaut de la vue des objets eux-mêmes, des schémas et par-dessus tout, du bon sens.

L'humanité a éprouvé de bonne heure le besoin de posséder l'image, le portrait réduit d'un vaste espace de terrain. Les explo-

rateurs de pays inconnus sont presque toujours guidés par des images informes tracées par des sauvages pour accompagner leurs explications. Dans nombre d'expéditions polaires arctiques, les marins ont été renseignés au moyen de dessins analogues exécutés par des Esquimaux. De là à nos cartes marines actuelles, la distance est considérable. Celles-ci n'ont pas besoin d'explications; elles sont précises, claires et immédiatement compréhensibles. On est parvenu lentement au résultat qui nous paraît aujourd'hui si simple. Il faut longtemps pour que l'idée en vienne à un homme plus clairvoyant que les autres et ensuite pour que tous la comprennent et l'acceptent. La fleur s'est plusieurs fois desséchée avant l'apparition du fruit et il est peu de découvertes qui n'aient été découvertes avant leur découverte : nouvelle preuve après tant d'autres de cette loi sociale que la moyenne intellectuelle d'une foule est notablement inférieure à la moyenne intellectuelle individuelle de ceux qui la composent.

L'histoire désigne comme l'inventeur des cartes de géographie Anaximandre, disciple de Thalès de Milet, l'un des sages de l'École Ionienne qui, entre 610 et 547 avant J.-C., s'efforça de faire une image, car on n'oserait dire une carte, des contrées alors connues de la terre. Ces premiers essais durent ressembler aux dessins des Esquimaux. Le travail d'Anaximandre fut repris et perfectionné par Hécatée de Milet, de cette même École Ionienne, vers la fin du VIe siècle.

Environ trois siècles plus tard, Dicéarque (326-296 av. J.-C.) entra dans la voie féconde de la précision en appliquant la géométrie à la construction des cartes. C'est lorsque le but poursuivi est compliqué qu'il importe surtout de procéder d'après une loi, une règle fixe, fût-elle insuffisamment exacte. On est encore très éloigné de la vérité, mais on reste dans sa direction. Les hommes passent, le document reste; d'autres arrivent qui font mieux en imaginant une règle plus précise que la première et à laquelle ils obéissent ; ils disparaissent, d'autres reviennent et travaillent. Ainsi, pas à pas, d'amélioration en amélioration, la perfection est atteinte. L'humanité a du temps devant elle.

Dicéarque imagina une loi et y obéit ; avec lui, l'image, le portrait cessa d'être un portrait et devint une carte qui, bien que grossière ébauche, contenait en germe la perfection comme l'enfant dès sa naissance possède à l'état latent toutes les forces et la puissance de l'homme mûr. La loi de Dicéarque est celle de la proportionnalité de l'image avec l'objet représenté ; c'est la loi des coordonnées.

Ces coordonnées étaient peu précises. Une ligne, le diaphragme, passant par l'île de Rhodes et les Colonnes d'Hercule, une seconde droite perpendiculaire à la première passant par l'île de Rhodes et par Alexandrie, servaient d'axes. Sur la carte, chaque localité était fixée d'après sa distance aux axes de coordonnées. On a peine à se figurer ce que devait être une telle carte dressée au moyen de distances évaluées, sur terre, en journées de marche, sur mer en journées de navigation, avec l'inexactitude provenant des inégalités du terrain, des sinuosités de la route maritime, de la façon peu exacte de mesurer le temps et qu'il fallait encore, sans être en possession d'aucune méthode précise, ramener à des directions déterminées perpendiculaires entre elles.

Ératosthène (276-196 av. J.-C.) apporta un peu de cette précision grâce à la mesure qu'il exécuta d'un arc de méridien terrestre. Pour cela il fallait d'abord admettre que la terre était ronde. L'idée s'en était répandue appuyée probablement sur des faits directs tels que la disparition de la base d'une montagne avant celle de son sommet pour un navire s'éloignant du port. Le phénomène est si net, si aisé à observer, qu'il a dû être remarqué par les premiers navigateurs et son explication touche à l'évidence. Puis il y avait l'ombre ronde des éclipses. La notion primitive du cercle pour l'horizon et par conséquent pour l'océan a été certainement suivie par celle de la sphéricité de la terre. Les marins n'en doutaient plus bien avant que les savants, les philosophes, arrivassent à la même conclusion par la route si trompeuse du raisonnement pur. Pour eux la terre était ronde parce qu'elle est la demeure de l'homme qui est l'être le plus parfait et que la sphère est le solide le plus parfait. Une perfection en appelle une autre.

Ératosthène supposant qu'Alexandrie était située sur le même méridien que Méroé où, le jour du solstice, le soleil venait éclairer le fond d'un puits très profond, ce qui prouvait que cette dernière ville se trouvait exactement sur le tropique, mesura la distance de ces deux localités et la trouva égale à 5 000 stades. Ce même jour du solstice, il mesura d'après la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, prise au gnomon, l'angle formé par les deux verticales d'Alexandrie et de Méroé ; il l'estima égal à 1/50 de la circonférence céleste et par conséquent de la circonférence terrestre. Un calcul simple lui donnait alors la circonférence terrestre totale. Les mesures étaient inexactes et les suppositions fausses, car Méroé n'est ni exactement sous le tropique ni sur le méridien d'Alexandrie. Cependant, comme Ératosthène obéissait à une loi plus précise que celle de Dicéarque, un grand progrès était accompli et l'on était désormais en état de choisir une échelle pour les cartes.

Hipparque (162-125 av. J.-C.) transforma les coordonnées rectilignes en coordonnées circulaires ; celles de chaque localité terrestre étaient observées astronomiquement, ramenées à des coordonnées perpendiculaires entre elles par parallèles et méridiens terrestres et marquées sur la carte d'après une échelle uniforme. Une grosse difficulté pour établir la proportionnalité des mesures sur le terrain et sur la carte est que les lieux sont disposés, sur la terre, à la surface d'une sphère, tandis que, sur une carte, ils sont distribués sur un plan. Or la sphère ne peut s'étaler sans déchirure ; elle n'a pas, comme le disent les géomètres, une surface développable. La difficulté d'ordre géométrique est impossible à éviter ; les cartographes modernes ont à lutter contre elle tout autant que les cartographes anciens. Aujourd'hui comme autrefois, ils la surmontent de la même façon, celle dont eut l'idée Cratès de Malle (150 av. J.-C.) en représentant la terre non sur une surface plane, feuille de papier ou de parchemin, mais sur un globe.

Pendant le IIe siècle après J.-C., Ptolémée pour qui la géographie était simplement l'art de dresser les cartes, rédigeait un catalogue des coordonnées de 8 000 localités terrestres et les reportait géo-

métriquement sur la carte. L'art de la cartographie était théoriquement établi, il ne s'agissait plus que d'améliorer les procédés pratiques et les instruments de mesure.

Au moyen âge, les besoins de la navigation firent imaginer les portulans, cartes indiquant le contour des côtes et dressées, non d'après des coordonnées astronomiques, mais d'après des azimuths, c'est-à-dire les directions rapportées aux points cardinaux d'où la localité terrestre à marquer est relevée par rapport à d'autres localités déjà placées sur la carte. Ces portulans apparurent en Italie au XIIIe siècle ; le plus ancien connu date de 1311 et a été exécuté par Petro Vesconti, de Gênes. Le seul instrument employé pour les construire était donc la boussole. La célèbre carte catalane de 1375 représentant le monde en six feuilles est due à un pilote de Majorque. Maintenant encore sur des cartes destinées à des marins peu instruits, sur des cartes de pêche par exemple, on indique au moyen de lignes les rhumbs du compas montrant la route à suivre entre les localités les plus communément fréquentées.

Les cartes marines sont construites aujourd'hui d'après des données géodésiques, c'est-à-dire astronomiques. On établit ainsi un réseau de triangles reliant un certain nombre de points terrestres remarquables entre lesquels on intercale les points secondaires d'après les procédés de la topographie. Sur mer où l'on ne peut mesurer de longueurs, on se raccorde par des mesures d'angles, les seules possibles à bord d'un navire, à des repères fixés à terre et dont les distances réciproques sont connues. Comme, quoi qu'on fasse, les points terrestres seront toujours sur une surface sphérique, alors que les cartes, pour être maniables, seront faites non sur des globes ou portions de globe, mais sur des feuilles de papier planes, on emploie un mode de report des localités de la sphère terrestre sur la carte qui se nomme une projection. La véritable définition d'une projection serait d'être la loi géométrique permettant de transporter mathématiquement, avec déformation forcée quoique toujours possible à évaluer, une portion de sphère qui n'est pas développable, sur une portion de plan. Il existe de nombreuses espèces de projections dont chacune possède ses avantages et ses

désavantages. Les cartes marines sont généralement dressées dans le système de Mercator.

On suppose la sphère enveloppée le long de l'équateur dans un cylindre droit. La projection de chaque localité est obtenue de telle sorte que son azimuth réel soit égal à son azimuth tracé sur la carte à l'aide d'une ligne droite. Cette direction, nommée loxodromie, joue un rôle important en navigation puisque c'est la route que doit suivre au compas un bâtiment afin de se rendre d'un point à un autre. Lorsqne tous les points terrestres ont été ainsi projetés, on fend longitudinalement par la pensée le cylindre, on l'étale et on possède la projection de la surface terrestre. Les méridiens seront représentés par des lignes droites parallèles équidistantes, tandis que les parallèles qui, sur la sphère, sont figurés de l'équateur aux pôles par des cercles de plus en plus petits pour finir par n'être plus qu'un point, au pôle lui-même, seront indiqués sur la carte par des droites perpendiculaires aux méridiens à des distances de plus en plus croissantes depuis l'équateur, figuré en vraie grandeur, jusqu'aux pôles situés à l'infini. L'impossibilité de représenter les régions polaires est un réel inconvénient de la projection de Mercator, racheté d'ailleurs par de sérieux avantages tels que la simplicité du canevas exprimé par des lignes droites perpendiculaires entre elles et la facilité d'estimer les azimuths réglant la marche des navires.

Sur une carte marine, la surface continentale qui n'offre d'intérêt que sur la côte, est couverte d'un grisé uniforme, tandis qu'au contraire, la surface de la mer est plus ou moins chargée d'indications : profondeurs fournies par les sondages et mesurées en mètres, lignes isobathes, secteurs de visibilité des phares et autres encore. Lorsqu'un sondage n'a pas atteint le fond, on inscrit à la place le nombre de mètres de corde inutilement filés et on le surmonte d'un trait horizontal.

Nous n'avons pas ici à nous occuper de géographie descriptive et néanmoins, pour donner une idée de l'immensité de l'océan, quelques chiffres sont indispensables.

Les eaux sont très inégalement distribuées sur le globe. L'hé-

misphère situé au nord de l'équateur contient relativement à l'espace continental, une étendue de mer notablement moindre que l'hémisphère au sud de l'équateur. L'inégalité de répartition se distingue mieux si on partage la sphère terrestre en deux hémisphères ayant pour pôles un point situé par 48° latitude nord et 1° 5′ longitude ouest de Paris, près de Cloyes dans le département d'Eure-et-Loir, et son antipode, en Nouvelle-Zélande. Dans l'un, véritable hémisphère continental, le rapport de la surface de la terre à celle de la mer est de 1 à 1,1 tandis que dans l'hémisphère aqueux, il est de 1 à 8,5. Au total, sur le globe entier, la superficie du sol exondé est à celle du sol inondé dans le rapport de 1 à 2,54. La surface de la mer est deux fois et demie celle de la terre.

Pour se rendre compte de la précision de cette évaluation, il est bon toutefois de se rappeler que 5,8 p. 100 de la surface du globe sont inconnus et, comme il s'agit de régions situées au voisinage du pôle arctique et surtout du pôle antarctique, on ignore si au-dessous du manteau de glace qui les recouvre, il existe de l'eau ou de la terre ferme.

La masse totale des eaux océaniques est évaluée à 1 279 000 000 soit à un milliard un tiers de kilomètres cubes. Ces chiffres ne représentent rien à l'esprit, une comparaison en rendra la portée plus facile à saisir. Depuis la naissance de Jésus-Christ jusqu'en 1901, il s'est juste écoulé un milliard de minutes. Il en résulte que le bassin actuel de la mer étant supposé vidé, un énorme fleuve débitant 1 kilomètre cube d'eau à la minute et coulant depuis le commencement de l'ère chrétienne, devrait encore couler pendant six cents ans environ avant de le remplir tel qu'il l'est aujourd'hui.

La plus grande profondeur marine actuellement connue est de 9 427 mètres, à l'est de la Nouvelle-Zélande ; elle dépasse de 600 mètres environ la plus grande altitude connue, celle du mont Everest ou Gaurisankar, dans l'Himalaya, qui est de 8 840 mètres. En admettant que toutes les montagnes soient nivelées, tous les abîmes comblés, l'eau contenue dans le bassin océanique actuel couvrirait le globe entier d'une couche ayant une épaisseur uniforme de 2 300 mètres.

Les cartes géographiques indiquent d'une manière très nette par une ligne sinueuse la séparation d'entre le sol ferme et l'eau. Cependant, dès le début, plusieurs questions se posent : Cette ligne est-elle une ligne de niveau ? En d'autres termes, le niveau des eaux marines est-il partout le même, semblable au niveau d'un liquide dans un vase ou tout au moins, puisque la terre est une sphère, ce plan est-il une surface sphérique partout également éloignée du centre du globe, ou bien est-il une surface plus ou moins ondulée comme celles que les mathématiciens appellent surfaces gauches ? En second lieu, le niveau des eaux en une même localité est-il permanent ?

Dès à présent, on peut répondre à la première question que le niveau océanique sur la terre entière est une surface gauche et, à la seconde question, que le niveau, en un même point, subit des variations continuelles. Le niveau actuel constaté aujourd'hui en un point quelconque des côtes ne sera pas le même dans un mois, dans un jour, dans une heure. Il est continuellement en mouvement plus ou moins violent car il dépend de causes multiples qui elles-mêmes varient sans interruption.

D'abord l'action même de la masse continentale. Les masses s'attirent entre elles. Si une montagne se dresse à pic au bord de la mer, comme le cas se présente en tant d'endroits, elle attirera la petite masse pesante attachée à un fil, autrement dit le fil à plomb qui indique la direction de la pesanteur. Or la surface de l'eau tranquille est perpendiculaire à cette direction, le niveau de la mer s'élèvera donc plus haut contre le pied de la montagne que du côté de la plaine et de la plage situées plus loin. D'ailleurs la montagne fixe et l'eau mobile s'attirant mutuellement, il est évident que c'est l'eau et non la montagne qui se déplacera. Cette même loi de gravitation fera que le long des continents recouverts d'une épaisse calotte de glace, l'eau qui atteint un certain niveau s'élèvera encore davantage si l'épaisseur de glace augmente tandis qu'elle s'abaissera si l'épaisseur de la glace diminue. Sur les côtes polaires, l'eau est plus haute en hiver qu'en été lorsque les glaces sont fondues, abstraction faite de l'effet d'une densité moindre. La

mer est moins élevée autour des îles isolées au milieu de l'océan que le long des continents.

Les études ayant pour objet la mesure de l'intensité de la pesanteur au moyen des oscillations du pendule prouvent que cette pesanteur est distribuée sur le globe d'une façon variable et comme si d'énormes cavités existaient au-dessous de certaines régions. Il est évident que le niveau de la mer doit subir l'influence d'un tel état de choses. Ces causes sont permanentes ou à peu près ; elles expliquent la différence de niveau en deux lieux différents, mais elles ne rendent pas compte de la variation en un même lieu. Celles qu'on peut invoquer pour l'explication du phénomène sont nombreuses.

En premier lieu, les marées qui, à ne considérer que leur cause élémentaire, l'attraction de la lune et du soleil, sont d'intensité variable. Elles le sont davantage si on prend en considération des causes secondaires qui les modifient : le vent qui amoncelle l'eau sur les rivages contre lesquels il souffle, les courants marins dont l'intensité change, la température qui dilate l'eau ou la contracte et aussi la pression barométrique car l'océan tout entier est un gigantesque baromètre à eau dont les oscillations sont à celles du baromètre à mercure dans le rapport de 1, densité de l'eau, à 13, densité du mercure. Des variations barométriques, de 5 ou 6 millimètres de mercure correspondent à des variations de 65 ou 90 millimètres dans le niveau de l'eau océanique.

Il en est d'autres. Une eau plus salée communiquant avec une eau moins salée, d'après un principe connu de la physique, les hauteurs de ces liquides seront inversement proportionnelles à leurs densités. C'est pourquoi le niveau de la mer est plus haut près des continents où se déversent les fleuves d'eau douce, qu'en pleine mer. Mais, même au large, combien de causes encore sont susceptibles de modifier ce niveau. La température de l'air le fera monter et descendre avec elle, la pluie l'élèvera moins par apport matériel de liquide que par affaiblissement de la salure et par conséquent de la densité ; l'évaporation en augmentant la proportion de sel contenu dans un même volume d'eau, déprimera le niveau. Il

est vrai que cette même évaporation donnera en outre lieu à deux phénomènes antagonistes. D'une part l'évaporation est activée par une forte température, d'où élévation de la mer et, d'autre part, elle est accompagnée d'un refroidissement qui tend au contraire à l'abaisser.

On le voit, le niveau de la mer, de même que tous les phénomènes naturels, est la somme algébrique, c'est-à-dire composée de termes additifs et de termes soustractifs, d'une foule de variables dont quelques-unes seulement ont été citées. On ne peut donc l'établir que d'une façon empirique en chaque point, par des moyennes de mesures longtemps prolongées et comme, pour le nivellement d'une contrée, il est indispensable de posséder un repère initial unique, chaque nation en a adopté un qui lui est particulier. En France on a choisi le niveau moyen de la Méditerranée, à Marseille, déterminé à l'aide d'un instrument appelé médimarémètre, installé sur un rocher, contre le rivage, dans l'anse du Prado. En Suisse, le zéro est une marque tracée sur un énorme bloc erratique, la pierre du Niton, qui émerge du Léman dans le port de Genève. D'autres pays ont simplement pris le sommet d'une borne plantée dans leur observatoire. Il importe peu que les repères soient marins ou terrestres ; les uns et les autres se valent. En définitive, le problème d'un zéro absolument fixe est impossible à résoudre puisque les points de repère sont toujours sur la surface terrestre dont aucune partie ne peut être considérée comme rigoureusement fixe. L'important est de relier entre eux tous ces points par un nivellement précis afin d'être en état de reconstituer le réseau dans le cas du déplacement accidentel de l'un quelconque d'entre eux. L'homme, sur cette terre instable, est incapable de faire davantage ; quant au reste, il lui faut prendre patience. Il y a quelques années, après les travaux de Saigey, d'Airy et d'autres savants, on admettait d'énormes variations du niveau moyen de la mer en des lieux divers et atteignant jusqu'à 1 309 mètres aux îles Bonin-Sima. L'ingénieur hydrographe Germain avait constaté, rien qu'en Provence, des déviations de la verticale variant entre 16″,6 à Nice, 12″,7 à Saint-Raphaël et 14″ à Toulon, correspondant par consé-

quent à de notables variations du niveau de la mer sur un espace assez restreint. Ces savants d'indiscutable notoriété s'appuyaient sur des calculs et des expériences très précises ; aujourd'hui les opinions ont changé et, même entre les diverses mers d'Europe, les différences arrivent à peine à quelques millimètres. En science comme dans le reste, il est des questions délicates sur lesquelles il n'est pas toujours facile de se former une opinion.

Les contours des côtes ne sont donc pas permanents. Ici la mer semble gagner sur la terre et là, au contraire, elle paraît reculer de sorte que des espaces jadis occupés par les eaux se transforment en terrain solide qui après quelques années, protégé par des digues artificielles contre l'invasion subséquente de l'océan, est livré à la culture et devient alors particulièrement fécond. Celsius et Linné en 1730 avaient constaté ces faits en Suède et depuis eux, ces observations se sont répandues. Après avoir reconnu de vastes régions soit d'émersion soit de submersion, on a été amené à subdiviser chacune d'elles en une infinité de portions juxtaposées, les unes s'enfonçant, les autres se relevant. Le sol s'affaisse en Hollande, en Belgique, sur les côtes de la Manche ; il se relève en France entre l'embouchure de la Loire et la frontière espagnole et en Languedoc sur la Méditerranée. Les régions d'émersion sont souvent caractérisées par la présence de dunes. Sur les côtes de la Baltique où ils ont été le plus particulièrement étudiés, les mouvements positifs ou négatifs s'effectuent avec une vitesse variable ; il en est de même dans la région du Saint-Laurent et des grands lacs d'Amérique. On reconnaît un mouvement de bascule autour d'un ou plusieurs axes plus ou moins rapprochés les uns des autres. Le Pacifique tout entier bascule autour d'un axe dirigé de l'est à l'ouest, à travers sa partie médiane, et de telle sorte que sa portion nord s'enfonce tandis que sa portion méridionale se relève.

Ces mouvements eustatiques, comme on les nomme, ont été l'objet d'une foule d'hypothèses. On les a étudiés avec précision en faisant des marques sur des rochers du bord de la mer et en relevant soigneusement leur altitude par rapport au niveau de la

mer à des intervalles de temps éloignés. On les a attribués tantôt à une modification locale dans les conditions de la mer voisine : envasement, changement dans la direction et l'intensité des courants marins, colmatage accompli par les fleuves, ou même, ainsi que M. de Drygalski l'a supposé pour certaines parties de l'Amérique du Nord, dilatation d'un sol abandonné par la calotte glaciaire. Quelle que soit l'importance prise dans telle ou telle circonstance par l'une quelconque de ces causes, il est évident que, d'une façon générale, ces mouvements résultent de l'instabilité de la croûte terrestre. Le globe se refroidit et, par conséquent se contracte ; la croûte offre des résistance très variables et attribuables à la disposition des couches la composant, à leur nature lithologique et à leur solidité plus ou moins éprouvée par des mouvements antérieurs. Alors qu'il est évident pour tous que les diverses parties d'une construction faite par la main des hommes offrent des solidités différentes, on ne saurait ne pas admettre qu'il en soit de même de cet édifice ou plutôt de cette ruine qu'est déjà la croûte terrestre. Il s'y produit des affaissements et des redressements que rend visibles la modification des lignes de côtes et, par ces faits, l'océanographie se rattache à la série des manifestations si multiples du volcanisme. On cherche les lois rigoureuses de ces phénomènes ; il est douteux qu'on les trouve. Ce travail est maintenant à la mode. Il permet de témoigner d'une immense science géographique d'ailleurs assez facile à conquérir en se servant d'atlas à grande échelle et très détaillés, d'inventer ou d'employer beaucoup de mots techniques, d'écrire de très gros volumes et parfois même de découvrir quelques faits intéressants. On aura beau faire, il s'agira toujours des lois qui gouvernent l'effondrement d'une maison. J'ai consulté des démolisseurs, gens de métier et d'expérience particulière en ces choses ; leurs réponses ne m'ont pas encouragé à me livrer à ce genre de recherches.

L'océan n'a pas de divisions régionales nettement tranchées ; les divisions sont une concession à la faiblesse de l'esprit humain. Elles sont cependant indispensables pour permettre à celui qui

enseigne de bien enseigner et à celui qui est enseigné de comprendre et de s'assimiler plus aisément l'enseignement qui lui est donné. Nous allons donc, pour ce motif, établir les divisions qui nous sembleront les meilleures pour le but que nous nous proposons, la facilité d'exposer et celle d'être compris.

L'océan est bordé par des rivages en donnant ce nom aux régions continentales toujours sèches des eaux océaniques quoique immédiatement contiguës aux plages.

Les plages qui font suite aux rivages sont tantôt presque nulles et tantôt assez étendues. Elles constituent à proprement parler la région qui, par le jeu des marées et des vagues, est alternativement sèche et mouillée.

Ces deux divisions sont admises par la plupart des auteurs; leur régime est très net, différent pour l'une et pour l'autre et diffèrent de celui des autres parties de l'océan. Le zéro des cartes marines part de la limite inférieure de la plage, le niveau des plus basses mers.

La troisième région dite littorale est celle comprise entre le niveau des plus basses mers et une profondeur de vingt mètres. Elle est située à peu près à la profondeur de dix brasses anglaises et son régime, dû à l'agitation active et pour ainsi dire continuelle des eaux, est encore très caractérisé.

La quatrième région comprise entre 20 et 200 mètres de profondeur est celle que l'on a nommée le plateau, le soubassement ou le socle continental.

Vient ensuite la région de transition comprise entre 200 et 500 mètres de profondeur.

La sixième région, celle de la mer improfonde, s'étend jusqu'à 1 000 mètres de profondeur.

Enfin la septième et dernière région est celle de la mer profonde ou abyssale, au delà de 1 000 mètres.

Cette classification est purement topographique. Quoique tout aussi artificielle que les autres, elle est plus simple et plus commode à retenir. On a créé de nombreuses subdivisions, généralement d'après la présence de telles ou telles espèces d'animaux.

Elles ne sont même pas rationnelles pour les zoologistes et le sont beaucoup moins pour ceux qui ne sont pas zoologistes. Pourquoi d'ailleurs faire intervenir dans une classification destinée à s'appliquer au globe tout entier un élément essentiellement local, l'être vivant dont l'existence en un endroit déterminé n'est pas même immuable puisqu'elle est la résultante d'une foule de conditions naturelles parmi lesquelles une seule étant modifiée suffit quelquefois pour motiver sa disparition.

Nous ne chercherons pas à nous livrer à une simple énumération des termes employés en géographie pour désigner les divers accidents des côtes et à donner pour chacun d'eux l'explication de ce terme. Ce serait œuvre de dictionnaire. Il convient moins d'expliquer que de permettre de découvrir soi-même l'explication et la genèse de chacun de ces accidents topographiques. Les phénomènes concernant les trois ou quatre premières régions présentent d'étroites relations communes. Là encore on retrouve une application de cette loi naturelle affirmant qu'un phénomène est une somme algébrique. Les caractères des rivages, des plages, de la région littorale et du plateau continental sont tous une fonction complexe des éléments suivants : hauteur de la côte, nature lithologique et géologique du terrain la constituant, marées, mouvements du sol, climat, voisinage d'un fleuve et, en dernier lieu, ce qui paraîtra presque paradoxal, l'action de la mer. En groupant ensemble par proportions relatives variables à l'infini ces diverses particularités, on obtiendra la côte avec ses caractères essentiels. En ce cas encore, les applications ne sont rien, la théorie est tout, car elle explique tout.

La côte est haute ou basse. Suivant sa nature lithologique et géologique, elle sera diversement attaquée par les agents atmosphériques, puisqu'elle n'est pas atteinte par les eaux de la mer. Celle-ci n'agira que comme un vaste espace découvert permettant aux vents d'exercer toute leur action. Être haute ou basse est le caractère primordial d'une côte ; cette influence se fait sentir sur tous les autres détails.

Si la côte est élevée, elle forme des falaises tantôt à pic quand

la roche est homogène et résistante comme la craie de la haute Normandie, tantôt avec éboulis si la texture lithologique est différente dans l'épaisseur d'une même falaise comme près du Havre où la résistance est moindre à la base qu'au sommet ou encore dans le cas où, du haut en bas, la roche est homogène, mais molle et facile à délaver par les pluies comme dans le Boulonnais et dans les falaises argileuses situées entre Villers et l'embouchure de la Dives.

Selon le degré de résistance de la roche, l'usure due aux agents atmosphériques sera rapide ou lente, mais elle se traduira par la production de criques ou d'anses. En avant de ces anfractuosités, au pied même de la falaise, on observera souvent et surtout si la mer gagne sur la terre, des piliers, rochers isolés comme les Demoiselles de Fontenailles et tant d'autres dont nos plages françaises sont abondamment pourvues, des aiguilles, des pyramides et jusqu'à des îles.

En avant de la falaise sans cesse détruite par l'atmosphère, l'attaque de la mer donnera naissance à une plate-forme constituée par les matériaux enlevés à la paroi verticale, éboulés et aplanis par les marées et les vagues. Les falaises s'usent régulièrement sur leur tranche, tantôt plus, tantôt moins. On a évalué la perte moyenne annuelle de celles de Normandie à une bande de 20 à 30 centimètres de largeur.

D'espace en espace, ces falaises sont coupées par une de ces fentes pratiquées dans la masse même de la roche et auxquelles les géologues donnent le nom de diaclases. Ces fentes livrent passage à un courant d'eau alimenté par le drainage du terrain environnant. Si le ruisseau d'eau est petit, quelquefois intermittent, et n'existant guère qu'au moment des fortes pluies et si la fente est par conséquent très étroite, on a une valleuse. Une rivière plus grande comporte une vallée plus large et, presque toujours, une ville est posée sur la mer à l'entrée de la vallée comme par exemple Fécamp, Saint-Pierre-en-Port, Étretat, et de l'autre côté de l'embouchure de la Seine, Houlgate, Dives à l'embouchure de la Dives ou Ouistreham à l'embouchure de l'Orne.

Quand un puissant cours d'eau tel que la Seine, la Loire ou la Gironde débouche dans une mer profonde à fortes marées et à courants violents, le mouvement de l'eau, aussi bien celle sortant du fleuve que celle de la mer dans laquelle il se jette, maintient ouvert le lit de ce fleuve et il se fait un estuaire parce que les troubles apportés sont immédiatement entraînés au loin. D'autres fois, l'estuaire est dû à une dislocation primitive du sol qui a creusé une vallée servant de thalweg aux eaux courantes. Dans ce cas qui est celui du Congo, la cassure apparente à travers le continent se continue à travers le lit océanique qui, lui aussi, est coupé par une vallée se prolongeant au loin sous les eaux.

Si la roche du rivage est dure, elle contient toujours des portions moins résistantes d'étendue variable qui s'usent davantage par l'action des agents atmosphériques et il en résulte les rochers de la Bretagne. Les côtes sont découpées par des criques variant de dimensions depuis le simple creux de rocher, plage minuscule où, à marée basse, les enfants s'amusent à ramasser les coquillages apportés par le flot sur le sable fin, jusqu'à de véritables petites mers intérieures comme la rade de Brest se continuant par le goulet et ensuite par l'Iroise, bordée au nord par d'innombrables rochers, îlots et îles, Quémenez, Molène, Ouessant, et, au sud, par la Chaussée de Sein terminée par l'île de Sein. Les diaclases de la roche facilitent ce sectionnement. D'autres fois, les découpures offrent la forme de coins, fissures du terrain immergées à la suite d'un enfoncement lent du sol, et l'on a des rias, comme les baies du Vigo, de la Corogne ou du Ferrol, les calas des Baléares, les scherms de la mer Rouge, les calanques de Provence si pittoresques entre la Ciotat et Marseille.

Lorsqu'à ces caractéristiques se joint un climat rigoureux et l'existence antérieure de glaciers ayant occupé ces fentes et exaré verticalement leurs parois, il se produit des fjords comme ceux de Norvège, d'Irlande, de Terre-Neuve, du Groenland, ramifiés à l'infini, remarquables par la profondeur de la mer qui y pénètre et par leur fond partagé en cuvettes inégales. Tels sont les lochs d'Écosse, les inlets de Colombie. Une autre explication ingénieuse

de leur genèse a été donnée par M. de Drygalski qui y voit un gonflement et un éclatement de la roche dure constituant la masse du terrain consécutif à la disparition de la calotte glaciaire à la suite d'un réchauffement rapide du climat.

Les côtes plates possèdent aussi des fjords à caractères analogues bien qu'atténués. On citerait comme exemples les fjords de Suède et les schären de Finlande, enchevêtrement de baies, d'îles et de petites falaises.

Les côtes plates ou basses sont remarquables par un certain nombre d'accidents topographiques spéciaux plus longs à expliquer qu'à comprendre, surtout lorsqu'on les a sous les yeux, soit en réalité, soit en dessins. J'ai été toujours surpris bien que j'en aie quelque habitude, du nombre de lignes, de pages nécessaires en géographie physique, pour décrire et analyser, malgré de réels efforts pour être court, ce qui se comprend immédiatement quand on le voit. Alors que je voyageais avec des compagnons sans la moindre éducation technique géographique : artistes, militaires, littérateurs, médecins, savants d'une autre spécialité que la mienne, combien de fois n'ai-je pas été émerveillé de constater devant un fait naturel, qu'ils en trouvaient sans hésiter l'explication, la genèse. C'est que la géographie physique n'est qu'une affaire de vue attentive et de simple bon sens. Je serais volontiers disposé à donner la même définition à d'autres sciences. Je m'arrête. J'ai peur d'être accusé de vouloir détruire trop de vénérations. Et cependant personne n'est plus que moi convaincu que des vénérations sont nécessaires et même indispensables, seulement j'estime qu'elles doivent être à leur place et attribuées aux choses et aux gens qui les méritent. Il ne manque ni des unes ni des autres.

Le régime des côtes basses est influencé par les mêmes facteurs que les côtes élevées et, pour elles encore, il y a lieu de prendre en considération l'ensemble des nombreux facteurs qui les modèlent : marées, courants, climat, peut-être un peu moins la nature géologique et minéralogique de la roche du rivage, l'action des fleuves qui viennent y déboucher et les autres. Si la côte offre des échancrures plutôt primordiales que creusées actuellement par

la mer, il se forme en avant un cordon littoral qui ne tarde pas à se consolider en constituant une barrière contre les eaux salées, de sorte qu'en arrière se crée une lagune destinée tôt ou tard à disparaître car, rapidement, s'il existe des cours d'eau qui s'y jettent, ou lentement dans le cas inverse, toutes les forces de la nature y compris l'homme, vont tendre à la combler. Si parfois une tempête rompt le cordon littoral, la brèche est bientôt réparée, naturellement ou artificiellement. Les courants ralentis déposent leurs vases qui exhaussent le niveau et, surtout dans les régions tropicales, le long des côtes à palétuviers, la végétation contribue aussi à ce comblement. Tel est le mode de formation des watten de la mer du Nord, précieux terrains de culture lorsqu'on les a asséchés par des canaux de drainage et qu'on en a garanti l'existence par la consolidation des digues qui les protègent, des marsches d'Allemagne enrichis par les dépôts fluviaux, des förden du Schlewig-Holstein, échancrures étroites, très ramifiées, anciens lacs que la mer a envahis à la suite d'affaissements du sol, des bodden d'entre le Mecklembourg et l'Oder, séries d'échancrures et d'îles provenant de ruptures antérieures du terrain.

Les cordons littoraux se transforment en flèches ou nehrungen comme dans la Baltique ou aux États-Unis. La lagune située en arrière est un haff. Puis il se fait une accumulation de sables et, si les marées sont fortes et la nature du sol peu vaseuse, les larges espaces couverts de sables siliceux se sèchent vite dans l'intervalle de chaque marée, le vent chasse les grains sans cohésion, les amoncelle en arrière et il se produit des dunes comme en Allemagne, au bord de la Baltique et en France sur la côte landaise. Ces dunes voyagent, poussées par le vent et elles engloutissent le terrain sur lequel elles progressent pareilles à de gigantesques vagues. On s'efforce de lutter contre l'envahissement par des semis de gazon de l'espèce appelée gourbet ou oyat et la plantation de forêts de pins. Les végétaux recouvrant le sol protègent le sable par leur feuillage, le retiennent par leurs racines et lentement, grâce au mélange des feuilles qui tombent, y introduisent un élément organique augmentant leur cohésion l'on finit par obtenir

une couche d'humus. Les environs d'Arcachon, travaillés depuis plus d'un siècle, sont maintenant recouverts de forêts qui en outre de leur rôle protecteur, fournissent de grandes quantités de résine.

Lorsqu'un fleuve considérable traversant une région basse se jette dans la mer, surtout si cette dernière est sans marées et sans courants et si le fleuve est limoneux, les grains d'argile transportés se coagulent au contact de l'eau salée, tombent immédiatement au fond et, mélangés au sable poussé par le courant, constituent un delta. Leurs formes sont très variées, mais se rattachent toujours à un même type comme les deltas du Nil, du Pô, du Rhône, du Mississipi, du Gange. Si l'apport des troubles est abondant, les marées et les courants faibles quoique existant, on aura une formation intermédiaire entre le delta proprement dit et l'estuaire qui est sa contre-partie et il se fera un delta immergé comme celui de la Mersey. Si la mer est absolument privée de marées et de courants et le fleuve très chargé de sédiments, ceux-ci s'amassent autour de l'embouchure et donnent naissance à une multitude d'îles basses séparées par des canaux comme les limans et les bugors de l'embouchure de la Volga dans la Caspienne, ou les sunderbunds de l'embouchure du Gange. Quelquefois même il se créera des lacs assez vastes comme à l'embouchure du Danube dans la Mer Noire et du Mississipi dans le golfe du Mexique.

Après le rivage et après la plage vient l'océan, cette énorme masse d'eau si grandiose, à la fois si belle et si terrible qu'elle a frappé d'admiration et de terreur sacrée les peuples primitifs qui l'ont connue. Ils ont vu en elle l'image de ce que devait être le monde immédiatement après être sorti du chaos et la demeure des dieux. Chaldéens, Hébreux, Égyptiens, Indous possèdent des mythes analogues; pour tous, selon les paroles de la Bible, *l'esprit de Dieu était porté sur les eaux*. Aujourd'hui l'océan cache encore bien des mystères, néanmoins il est connu dans ses traits principaux et la science qu'on en possède, pour être devenue précise, n'en diminue en rien la majesté. Il est la grande officine de vie depuis sa surface jusqu'en ses plus profonds abîmes; partout il fourmille d'êtres vivants. Sa grandeur résulte surtout de sa sim-

plicité, de son admirable unité d'autant mieux appréciables qu'on l'examine plus attentivement. Son étude est la véritable introduction logique à la météorologie qui est l'océanographie de l'air, à la géologie stratigraphique qui est de la paléo-océanographie, à la zoologie qui est, dans sa plus vaste acception, la recherche des lois de l'adaptation des êtres aux conditions du milieu au sein duquel ils vivent.

Chacune des caractéristiques de l'océan sera traitée en détail; il convient cependant d'en donner dès à présent une notion générale.

L'eau océanique est salée et, soit comme proportion totale, soit comme proportion relative des divers sels contenus, cette salure n'est pas partout identique. En d'autres termes, l'eau de la mer n'est pas de l'eau distillée contenant selon la localité une proportion variable d'un même mélange identique de divers sels. Elle tient en dissolution tous les corps de la chimie parce que tous, quels qu'ils soient, sont plus ou moins solubles. L'analyse y découvre les éléments qu'on s'attendrait le moins à y rencontrer, métaux communs, métaux rares et métaux précieux, aussi bien le fer, le manganèse ou le zinc que l'or et l'argent. Sans cesse en mouvement, elle se vaporise dans l'atmosphère, se résout en pluie, lave et pénètre toute terre et finalement revient par les fleuves à l'océan d'où elle est sortie. Elle a tout touché, s'est emparée de tout ce qu'elle a pu prendre et comme, si faible que soit la quantité dissoute, une fois qu'elle a été amenée au sein de l'océan, elle ne le quitte plus, on conçoit que la mer qui a la masse et presque l'éternité, si l'on est en droit d'employer ce mot pour quelque chose qui est, renferme tous les corps du globe. Le plus répandu, le plus abondant est le sel marin, le chlorure de sodium, résidu de l'épuration primitive de l'atmosphère, des premiers lavages des matériaux terrestres, à l'aurore du monde et depuis, confiné à jamais au sein des eaux marines. On a beau remonter dans la nuit des âges géologiques, aussitôt que la mer a existé, elle a été salée et sa proportion n'en a probablement guère changé, puisque l'on trouve aujourd'hui dans nos mers modernes sur lesquelles flottent

nos navires, certaines coquilles, *Discina* et autres qui, avec la même forme, foisonnaient déjà dans les mers cambriennes.

Au sein de cette masse liquide s'accomplit sans interruption une série de phénomènes chimiques, physiques et mécaniques dont l'étude détaillée sera ultérieurement reprise. C'est ainsi que la chaleur de l'atmosphère émanant du soleil pénètre à travers les eaux et s'y atténue à mesure qu'elle descend plus profondément. A la surface elle est presque aussi variable que dans l'air qui est immédiatement contigu et dont toutes les variations se répercutent en elle quoique atténuées. Froide l'hiver, la mer est chaude l'été et toutes les alternances de température de l'air y ont comme un écho. La variation du jour à la nuit cesse déjà de se faire sentir à une faible profondeur ; pour trouver la zone insensible aux variations d'été et d'hiver, il faut descendre davantage. Plus bas encore, vers un millier de mètres de profondeur, disparaissent les variations séculaires. Alors commence la zone d'immobilité thermique qui se continue jusqu'au fond et, par une progression lente et régulière, la température devient de plus en plus froide jusqu'à ne posséder que un ou deux degrés au-dessus de zéro, selon la profondeur, même dans les régions tropicales où pendant l'année entière, le soleil darde sur les flots ses rayons brûlants. Dans les régions polaires, la surface de la mer se congèle et, qu'elle se forme ou qu'elle disparaisse par fusion, cette épaisse croûte de glace modifie la nature de l'eau restée liquide qui lui est sous-jacente et finit par donner lieu à des phénomènes extrêmement complexes intéressant l'équilibre mécanique de l'océan.

Il en est presque de même de la lumière dont l'action s'arrête à une faible distance de la surface, 200 ou 300 mètres à peine. La pénétration extrême de la lumière sert de limite à la zone d'habitabilité des plantes marines incapables de vivre sans elle. Or, si les plantes ne dépassent pas cette limite, il en est de même des êtres auxquels elles servent de nourriture, les herbivores. Au-dessous de cette zone jusqu'aux plus profonds abîmes, rien que l'obscurité éternelle, une nuit opaque au prix de laquelle la plus sombre de nos nuits serait presque une débauche de lumière. Ces

ténèbres sont seulement traversées, comme par des feux follets, de phosphorescences bleues, jaunes, vertes, émanant des corps des carnivores et dont la nature les a doués afin de leur fournir le moyen de chercher leur proie; ces êtres animaux, bizarres et effrayants, poissons qui ne sont qu'une gueule énorme suffisant à peine à la tâche d'alimenter un corps filiforme, requins que j'ai vus ramenés de profondeurs de 2 000 ou 3 000 mètres, en plein océan Atlantique, dont le corps noirâtre, hideux s'étalait flasque sous la splendeur du jour l'éclairant pour la première fois, dont la tête aplatie comme celle d'une vipère géante, portait une mâchoire armée de formidables rangées de dents et dont l'œil brillait d'une lueur horrible, aussi glaciale moralement que le contact de leur peau visqueuse glaçait la main qui la touchait, lueur verdâtre, livide, glauque, pâle et puissante à la fois, semblable à celle d'une fournaise brûlant au loin, aperçue tout au bout d'un immense tunnel aux parois faites de ténèbres.

A mesure qu'on descend, la pression exercée devient plus considérable. D'une seule atmosphère, c'est-à-dire de 1 kilogramme environ par centimètre carré à la surface de l'océan, elle est déjà double vers 10 mètres de profondeur; à 9 500 mètres elle est de 950 atmosphères, c'est-à-dire 950 fois aussi forte et par conséquent de près de 1 000 kilogrammes par centimètre carré!

Au point de vue mécanique, la surface de l'océan est continuellement parcourue par les vagues que sans relâche font naître et apaisent les vents de l'atmosphère, soit qu'ils soufflent les terribles tempêtes des cyclones ou que leur grande haleine, toujours égale et régulière dans sa puissance, soulève les énormes vagues de l'Atlantique et du Pacifique Sud. Si formidables qu'elles soient, leur agitation s'atténue vite en profondeur. Les courants eux-mêmes qui parcourent l'océan et imitent le réseau de veines et d'artères sillonnant le corps humain, se croisent, se superposent depuis la surface; variables dans leur intensité et leur direction, ils s'atténuent promptement, eux aussi. Au delà d'un millier de mètres, tout mouvement permanent s'apaise et cette région d'éternelles ténèbres, de température immuable est aussi celle du calme et du repos.

Sur le fond règnent pourtant toujours l'activité de la vie, l'activité géologique et l'activité chimique. Là s'élaborent des roches semblables à celles que nous voyons autour de nous, dont nous construisons nos maisons et qui apparaîtront peut-être à la lumière ou plus probablement demeureront à jamais submergées. La nature qui possède l'éternité accomplit pour elle seule son œuvre dans son émouvante perfection. Ces roches surgiront-elles alors seulement que toute humidité aura été absorbée par les minéraux de l'écorce terrestre épaissie par le refroidissement de la planète et que notre terre sera réduite à l'état d'astre mort comme la lune? Mortes ou vivantes, les roches qui apparaîtront sous la lumière des mondes, seront aussi parfaites que celles qu'observent aujourd'hui nos microscopes. Qu'importent quelques milliers de siècles; la nature obéit éternellement aux lois; la perfection est aussi complète dans l'univers que dans le grain de sable et l'intelligence humaine troublée s'anéantit d'humilité devant tant de majesté.

Jusqu'à ces derniers temps, la terminologie des accidents du relief sous-marin laissait beaucoup à désirer : chacun d'eux était nommé sans règle fixe et il en résultait qu'aucune équivalence n'existait entre les termes en usage chez les diverses nations s'occupant d'océanographie. Une commission émanée du Congrès international de Géographie en 1899 et réunie à Wiesbaden en 1903, a mis heureusement fin à ce regrettable état de choses. Une quinzaine de termes principaux ont été rigoureusement définis et l'on a établi leur absolue synonymie en allemand, en anglais et en français. L'accord est donc maintenant complet parmi les océanographes et les mots possèdent désormais une signification précise et identique dans les trois langues.

Si, pour se faire une idée du sol sous-marin, on examine attentivement des cartes par isobathes et des coupes à travers l'océan, on remarque tout d'abord que le fond est aussi accidenté que la surface continentale. Les traits de détail diffèrent, mais ce qu'on appellerait volontiers la charpente, demeure la même. La terre est modelée par le vent — c'est la déflation — par l'eau courante, c'est

l'érosion — par les glaces, c'est l'exaration — par la mer, c'est l'abrasion. Or, l'érosion si puissante sur les continents est nulle au fond de l'océan, si on fait abstraction de quelques sources d'eau douce qui sortent des couches au voisinage de la terre. Il en est de même de l'exaration, car il n'y a pas de glaciers sous-marins et les effets se réduisent au frottement exercé par les grands icebergs qui, sur les confins des régions polaires, dans des parages peu profonds, râclent le fond sur un parcours restreint. Les résultats sont minimes car un quart ou un cinquième environ du volume d'un iceberg flottant demeure à l'air et comme un iceberg d'une cinquantaine de mètres de hauteur est déjà assez rare, il en résulte que celui-ci atteint au plus 200 ou 250 mètres de profondeur. L'action exarante ne s'exerce donc que par petits fonds. Il est douteux qu'elle soit jamais bien violente, car le frottement sur une vaste surface provoque l'échouage de l'iceberg qui s'immobilise et ne se remet en route qu'au moment où la fusion, modifiant son centre de gravité, le fait chavirer et diminue de la sorte son pied dans l'eau. J'en ai observé de nombreux échoués ainsi du côté du détroit de Belle-Isle, au nord de Terre-Neuve, et j'aurais vivement désiré, ce qui ne m'a pas été permis, donner un coup de sonde auprès d'eux afin de comparer leurs deux hauteurs immergée et émergée. Il est à souhaiter qu'un de nos officiers de la station de Terre-Neuve se livre à ce travail qui fournirait une donnée utile. Ce serait l'évaluation moyenne, dans des circonstances connues, de la forme d'usure d'un iceberg.

L'abrasion est presque nulle, car elle se réduit à l'action des vagues le long du rivage, beaucoup moins active qu'on ne serait porté à le croire et qui d'ailleurs se borne à la zone tout à fait superficielle. Le mouvement des vagues est pratiquement sans effet sensible sur le fond à une vingtaine ou à une trentaine de mètres de profondeur et, contre les falaises, non seulement il se borne à quelques mètres de hauteur verticale, mais le plus souvent, grâce à l'action de la terrasse côtière, dans les régions à marées, son action s'atténue à mesure de ses progrès. Dans les mers sans marées, elle reste insensible à moins qu'elle ne soit

accompagnée de mouvements positifs, c'est-à-dire d'enfoncement apparent du sol sous les eaux.

La déflation ou action du vent, puissante sur les rivages, active encore sur les grèves et les plages, est nulle au-dessous des eaux, au moins directement. Indirectement, par les courants que crée le vent, on entre dans le domaine de l'abrasion et l'on sait combien il est restreint.

Il résulte de cet ensemble de considérations que, tandis que le modelé terrestre est excessivement déchiqueté, le modelé marin l'est fort peu. Si le long des terres les pentes, plus abruptes qu'on ne le suppose, sont comparables et fréquemment supérieures même aux plus fortes pentes terrestres, d'une façon générale, une fois la région tout à fait côtière dépassée, les contours du sol immergé deviennent mous et arrondis. La sculpture par les agents extérieurs ne s'exerce pas et, en outre, les traits existants sont, comme le dirait un peintre, empâtés par la pluie de matériaux meubles, sédiments minéraux et surtout carapaces calcaires et siliceuses d'animaux vivant à la surface ou dans les eaux intermédiaires et tombant après leur mort sur le fond. Rien ne serait plus monotone qu'une promenade au fond des eaux, sauf dans la région côtière dont le relief, même aux endroits les plus favorisés, serait encore loin du pittoresque de celles qui, sur la terre, en possèdent le moins. On traverserait d'immenses plaines plus vastes que les steppes de la Sibérie ; le terrain s'élèverait et s'abaisserait par des pentes si faibles qu'elles seraient invisibles. Les trois quarts du Pacifique sont dans ce cas. Pour le reste, on trouverait de longs vallonnements sans caractère et, seulement dans de rares circonstances, au voisinage d'archipels volcaniques ou coralliens, on rencontrerait des sortes de pics abrupts se dressant presque verticalement des profondeurs vers la surface. La monotonie de la forme serait complète, celle de la nature du sol le serait davantage si possible, et à l'exception de quelques espaces de sables, de galets ou d'herbes confinés dans la zone du plateau continental, partout l'œil ne distinguerait qu'une vase de couleur gris pâle, un peu rosée à l'état humide, ou gris foncé à l'état sec, de composition plus

uniforme que le sable qui couvre l'espace relativement restreint des déserts continentaux. Ce serait une interminable série de quelques hammadas, de sables désertiques ou de cette argile sableuse des takyrs de l'Asie centrale. Et quand le voyageur perdu dans cette immensité, courant avec la vitesse d'un train rapide pendant des journées entières, distinguerait tout d'un coup les falaises rocheuses d'un volcan sous-marin ou la pente d'une île volcanique ou d'un atoll, il les considérerait comme une récréation momentanée, une joie de son œil, un divertissement à son lourd ennui. Il faudrait aller d'un train de dépêche télégraphique pour ne pas s'ennuyer à mourir pendant un voyage à travers les grands fonds de la mer.

Au voisinage de la terre, la diversité apparaîtrait un peu. On trouverait un terrain plus accidenté, semé de plaines d'étendue restreinte, coupé de ressauts ou de ravins étroits aux pentes quelquefois si brusques qu'ils ressemblent, comme les rechs du golfe du Lion, à de véritables coups de sabre qu'un géant aurait donnés sur le fond. C'est ce qui a suggéré à un officier de la marine française, le commandant Trudelle, une ingénieuse méthode de navigation destinée à guider les navires par temps de brume. Il suffit de posséder une carte par isobathes de la région et s'étendant suffisamment loin au large, depuis l'entrée de la Manche, par exemple, jusqu'au Havre, l'un des points particulièrement étudiés par le commandant Trudelle. Le capitaine d'un vapeur venant de New-York et se rendant dans ce port est surpris par le brouillard en avant d'Ouessant. S'il emploie la méthode Trudelle, il rentrera au port en quelque sorte les yeux fermés. Il sonde et d'après la profondeur obtenue, il s'avance dans une direction déterminée jusqu'à ce que, sondant toujours, il trouve une autre profondeur indiquée. Alors il change sa direction, en prend une nouvelle marquée par ses instructions, toujours guidé par la sonde et, ainsi de suite, de proche en proche, modifiant sa route d'après les profondeurs, il réduit chaque fois de plus en plus son écart de la véritable direction jusqu'à ce qu'il soit parvenu en face même du port sans avoir un seul instant aperçu la terre. La méthode a été rendue encore plus précise par le commandant de Roujoux qui a su compléter les indi-

cations de la topographie par celle de la lithologie sous-marine.

Les terrains volcaniques constituent un élément important du relief du fond de l'Océan. Sortis des profondeurs du globe par des ouvertures en forme de fentes droites ou courbes, ou bien d'orifices isolés quoique fréquemment disposés suivant une direction commune, groupés plus spécialement en de certains parages de la mer, tantôt apparaissant à la surface en îles dénudées ou ornées d'une végétation luxuriante, ils sont dispersés sur toute l'étendue du sol océanique. La plus grande partie des produits d'éjection, à l'état de fusion ignée, subit au contact de l'eau de mer froide un « étonnement ». Le changement brusque de température les réduit en grains impalpables qui repris par les mouvements de la masse liquide sont étalés sur de vastes espaces. Ces mouvements sont ceux des vagues et des courants lorsque l'éruption s'est effectuée près de la surface. Dans le cas d'éruptions profondes, se manifestant par des tremblements de mer, les matériaux sont transportés par un courant originaire du fond lui-même et dû à l'échauffement même du sol, autre manifestation de l'activité volcanique. Après que l'étonnement a eu fait sentir ses effets, il doit rester autour de la bouche d'éjection un amas de roches demeurées massives et compactes grâce à la lenteur de son refroidissement, mamelons sous-marins que pendant les intervalles de repos, recouvre d'un dépôt mince ou épais la pluie continue d'animalcules tombant de la surface. Les volcans sous-marins devenus îles offrent de fortes pentes par gradins immergés successifs et il en est de même des îles coralliennes, curieuses formations dues à des êtres vivants, coraux, madrépores et autres, républiques immenses d'animaux fixés à un même squelette calcaire que tous ensemble ont contribué à fabriquer, qui relie ensemble à jamais les morts et les vivants et dont la genèse encore incomplètement élucidée est un des plus intéressants problèmes de la géographie.

La vaste masse d'eau de l'océan, dans ses propriétés de tout genre, est le champ d'étude de l'océanographie et les lois découvertes trouvent une application immédiate en zoologie. Bien plus que sur la terre continentale, les relations entre l'être vivant et le

milieu possèdent, au sein de l'atmosphère liquide, leur minimum de complication ce qui, d'ailleurs est loin de signifier qu'elles soient devenues simples. Dans cet énorme bloc liquide, les conditions physiques en quelque sorte amorties, se modifient par passages atténués et il en est forcément de même des êtres qui l'habitent. Relativement à la mesure des propriétés topographiques, physiques et chimiques ou, pour tout résumer d'un mot, océanographiques, l'être vivant est un instrument comme les autres. Il offre cependant des caractères qui lui sont spéciaux et qui, ainsi que le dirait un physicien, rendent son emploi difficile. Quoique extrêmement délicat, il possède le premier désavantage de ne pas mesurer une propriété quelconque définie, comme un thermomètre qui mesure la température et rien que la température ou un manomètre qui mesure la pression et rien que la pression, mais tout un ensemble de conditions ambiantes, non isolées les unes des autres, température, pression, nature du fond, profondeur, courants, gaz dissous, lumière et le reste. L'être vivant considéré comme instrument présente ce second désavantage d'avoir une graduation fâcheusement restreinte car elle ne comporte que trois degrés. Si les conditions ambiantes lui sont particulièrement favorables, l'être vivant est très abondant; si elles lui sont franchement défavorables — et encore s'agit-il d'un total de conditions, car dans l'ensemble, à supposer que toutes les autres puissent être favorables, si une seule d'entre elles est complètement défavorable, on obtient le second degré de la graduation, l'absence. L'être capable de se déplacer s'enfuit; celui qui en est incapable, animal ou plante, meurt et, d'une façon comme de l'autre, l'absence se manifeste. Enfin si les conditions ambiantes ne sont ni complètement favorables, ni complètement défavorables, on a le troisième terme de la graduation, la rareté des individus ou leur état de misère physiologique. Cette totalisation des conditions d'une part et cette insuffisance de la graduation d'autre part, compliquent fortement la solution du problème zoologique. On n'y parviendra que lorsque les naturalistes s'occupant des animaux marins se seront franchement astreints à n'avancer qu'après s'être dûment éclairés aux

lumières de l'océanographie. Il n'est point ici question de prééminence à établir entre les deux sciences : océanographie et zoologie, mais il y a pour l'une, l'océanographie, antériorité forcée d'application sur l'autre, la zoologie. Comme on a persisté à agir autrement, il en est résulté une difficulté ou pour parler plus franchement, une impossibilité à la solution d'un problème qui par lui-même n'était déjà que trop compliqué. Il faut étudier méthodiquement la question et, dans le cas actuel, le bon sens à lui seul, indique que pour établir les relations entre l'être vivant et les conditions du milieu, il convient avant tout de connaître les conditions relativement plus simples à observer parce qu'on possède le pouvoir de les étudier isolément, l'une après l'autre : la profondeur seule avec une sonde, la température seule avec un thermomètre, la pression seule avec un piézomètre, instruments précis et à graduation abondante, au lieu de se servir d'un hareng ou d'une sardine, êtres vivants, instruments totalisateurs et insuffisamment gradués. Procédons logiquement, du moins difficile au plus difficile, ne perdons jamais de vue le bon sens, agissons par chiffres, expériences, cartes, analyses et synthèses et nous viendrons à bout de tous les problèmes. Quand, éclairé par l'océanographie, le zoologiste aura fourni au paléozoologiste ou au paléobotaniste, grâce à la présence constatée d'un ensemble de fossiles dans une couche géologique, la possibilité d'affirmer la profondeur à laquelle était située cette couche alors qu'elle était en train de se former au sein de l'océan disparu depuis des milliers d'années, on saura la température, la salure, la densité et le reste de l'eau qui la baignait. La géologie stratigraphique, science à peu près entièrement de descriptions, d'énumérations, d'inductions plus ou moins hasardées et sans sanction, sera transformée en paléogéographie, science exacte comme l'ont répété depuis si longtemps Pfaff, von Hoff et tant d'autres en Allemagne; Delesse, Ch. Sainte-Claire Deville, Daubrée en France. Bon gré, mal gré, elle y arrive à grands pas.

L'humanité n'a pas dû tarder beaucoup à observer que la mer servait de demeure à des êtres vivants bons à dévorer. Poissons

d'eau douce, poissons d'eau de mer, la pêche est presque aussi vieille que l'homme, presque aussi vieille que la faim. Mais entre savoir qu'il existe des animaux aquatiques, découvrir la façon de s'en emparer et avoir l'idée de chercher les lois de leur distribution, d'abord pour connaître celles-ci, puis pour pêcher méthodiquement, il s'est écoulé des siècles.

Au moyen âge, vers 915, le savant voyageur arabe Maçoudi pensait que certaines mers renferment des animaux tandis que d'autres — et en particulier le Grand Océan — n'en contiennent pas. Il raconte une curieuse légende sur la façon dont le roi Alexandre se renseigna sur la nature des êtres, un peu animaux et beaucoup génies, habitant la mer au voisinage d'Alexandrie dont ils empêchaient la fondation. Le roi se fit tout simplement descendre au fond de l'eau dans une cloche à plongeur ce qui prouve que l'invention est plus ancienne qu'on ne le suppose. Il est vrai que tel qu'il est décrit, l'appareil laissait assez à désirer pour que tout autre que le légendaire héros qui s'y serait enfermé aurait payé cher sa hardiesse.

Au XVIe siècle, Hans Sloane étudie les algues et sir John Hawkins, navigateur anglais, signale l'extrême abondance de la vie pélagique.

Le véritable début des études sur les êtres marins date réellement du XVIIIe siècle. On y fut amené, en Italie, par l'observation des couches terrestres. On découvrit des fossiles dont on constata l'analogie avec les coquilles des rivages actuels, ce qui était d'autant plus facile que les couches fossilifères italiennes sont d'âge relativement récent. On remarqua que si certains de ces fossiles manquaient aujourd'hui de représentants côtiers, ils en avaient sans doute dans les profondeurs océaniques, de sorte que celles-ci devaient être habitées. A la même époque (1729), Baccari examinait comparativement au microscope les débris fossiles des roches sédimentaires et ceux des fonds marins voisins du rivage et il signalait la ressemblance mutuelle des uns et des autres. La géologie et la paléontologie ont servi d'introduction à la zoologie marine, parce qu'il est moins pénible d'étudier une roche mise à

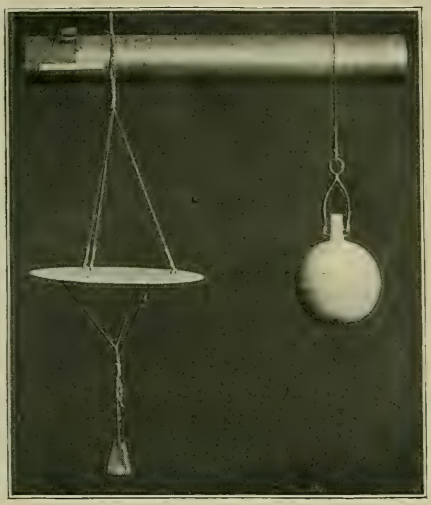
nu dans une carrière que de la récolter au fond d'une couche d'eau, même peu profonde.

Les nombreuses expéditions maritimes qui eurent lieu pendant la seconde moitié du XVIIIe et le commencement du XIXe siècle comptaient pour la plupart parmi leurs membres des naturalistes qui s'occupaient à recueillir et à décrire des animaux marins. La science bénéficia de tout ce que l'on apprit relativement aux animaux pélagiques, mais on ignorait toujours si le fond même était habité. Là était la grande question d'autant plus irrésoluble pour le moment qu'il fallait tout d'abord savoir atteindre ce fond, ce à quoi l'on ne parvenait pas.

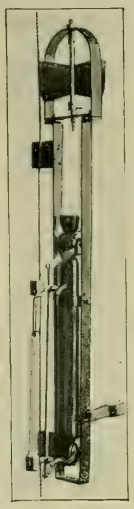
Cependant l'attention demeurait éveillée et les tentatives persévérantes que l'on ne cessait de faire pour toucher le sol sous-marin au moyen de sondages acheminaient vers le succès. En science, tous les progrès sont solidaires et, dans cette chasse aux vérités, le butin rapporté n'est pas toujours celui à la poursuite duquel on s'était lancé.

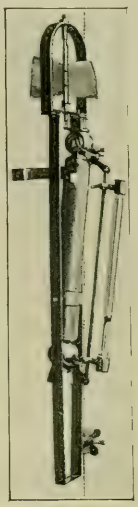
Sir John Ross, en 1818, sondant par grandes profondeurs, dans les régions polaires arctiques, ramena, enchevêtrés dans sa ligne ou même accrochés à son plomb de sonde, des animaux de forme nouvelle. Mais, était-on assuré qu'il provenaient bien des profondeurs considérables auxquelles était parvenu le plomb, ou bien avaient-ils été rencontrés au passage entre la surface et le fond? Les savants n'attachaient pas une importance suffisante à ces faits qui n'étaient pas encore de mode. On trouvait parfois à la côte ou à la surface de l'eau des animaux morts, d'aspect inconnu, et souvent bizarre qui ne pouvaient venir que des profondeurs d'où ils avaient été ramenés accidentellement par des tempêtes ou d'autres causes. Cependant, comme il arrive souvent, le problème était résolu sans que les savants s'en doutassent par les pêcheurs portugais de Sétubal qui depuis longtemps pêchaient à la ligne des requins à plus de mille mètres de profondeur.

En 1840-1843, le naturaliste anglais Edward Forbes embarqué à bord du *Beacon* dans la mer Égée, crut être en droit d'affirmer l'existence d'un zéro de la vie animale qu'il fixa à 300 brasses



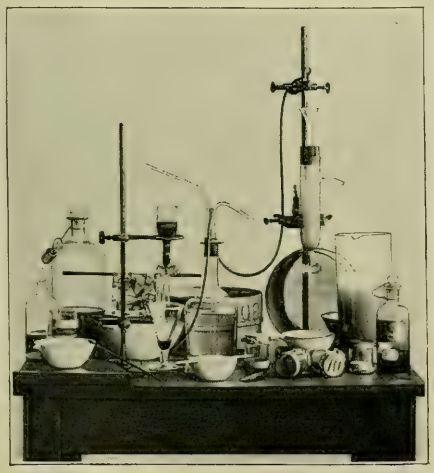
LUNETTE D'EAU, DISQUE DE SECCHI ET BOULE
A TRANSPARENCE



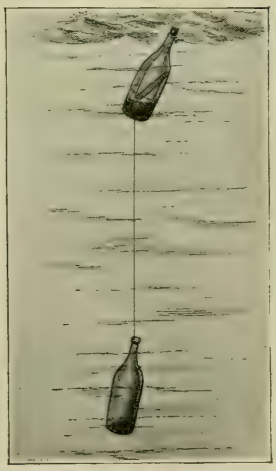


(*a*) (*b*)

BOUTEILLE DU Dr RICHARD
(*a*) à la remontée (*b*) à la descente



INSTRUMENTS
POUR L'ANALYSE DES FONDS MARINS



BOUTEILLES A COURANTS
DE HAUTREUX

et d'un zéro de la vie végétale situé encore moins profondément. Il avait raison pour la vie végétale qui, ayant un besoin indispensable de lumière ne saurait descendre au-dessous de la limite relativement faible de pénétration de celle-ci. Il avait tort pour la vie animale qui existe à toutes les profondeurs.

En 1842, Aimé exécutant devant Alger des sondages, établit très nettement la présence d'animaux entre 300 et 1 500 mètres. Ses plombs de sonde lui avaient en effet rapporté, souillés par la boue du fond, des méduses et des siphonophores. Aimé n'était rien moins que zoologiste ; il avait une antipathie instinctive pour cette science, ainsi que ses notes d'élève à l'école normale en font foi, mais son esprit était trop clairvoyant pour ne pas saisir l'importance de sa découverte et, dans son incapacité de donner un nom à ces animaux et de les décrire scientifiquement lui-même, hors d'état de les confier à un spécialiste parce qu'à Alger il n'y en avait pas, il se borna à les dessiner, à les décrire en véritable profane qu'il était, à déclarer que ces êtres vivaient bien sur le fond et à publier le document. Bien que le travail eût paru dans une publication officielle, elle n'attira pas plus l'attention que le reste de ses magnifiques recherches. L'océanographie a donné en France d'admirables fleurs, plus admirables qu'ailleurs, mais jusqu'à présent, le sol et le climat ne leur ont pas été favorables, car elle n'ont jamais fructifié.

Le câble télégraphique posé entre la Sardaigne et l'Algérie se rompit en 1860. La compagnie télégraphique anglaise chargée de le réparer en recueillit des fragments qui furent examinés par divers savants anglais. M. Milne-Edwards, en France, fut mis en possession de l'un d'eux et y reconnut la présence de coraux enveloppant le câble et qui, solidement fixés, n'avaient évidemment pas été accrochés au passage entre le fond et la surface. Il garantit donc la présence certaine de la vie à 3 000 mètres. Depuis cette époque, grâce au perfectionnement des divers engins de pêche et aux progrès considérables de l'océanographie, la mer a été fouillée dans toutes ses profondeurs : partout existe la vie, à la surface, dans les eaux intérmédiaires et jusque dans les abîmes. La vie

terrestre est rare et clairsemée, l'air où l'oiseau ne fait que passer n'est pas habité, seule la superficie des continents est peuplée, tandis que l'océan fourmille de vie dans l'épaisseur entière de sa masse.

La répartition des organismes dans la mer dépend, comme tout phénomène naturel, d'une foule de conditions : mouvement des eaux, nature du sol sous-marin, profondeur, lumière, température, salure, pression et d'autres encore. Chacune de ces conditions devra être étudiée à part ; il suffira de présenter ici une vue générale du sujet.

L'ensemble des êtres océaniques, animaux et végétaux, se classe en trois grandes catégories : le Benthos, le Nekton et le Plankton.

Le Benthos comprend les êtres vivant sur le fond, le Benthos sessile fixé complètement au sol, le Benthos vagile ou errant. Sa flore se compose d'algues vertes, de diatomées, de floridées, plantes sans racines et qui munies de simples organes de fixation, n'empruntent au sol qu'un appui. Parmi les animaux, on y connaît des foraminifères, des infusoires, des bryozoaires, des spongiaires, des astéries, crinoïdes, ophiures, échinides, holothuries, brachyopodes. Parfois le Benthos flotte à la surface comme les *Lepas* qui s'attachent aux morceaux de bois flottant, épaves entraînées par les courants. Le Benthos abyssal ne compte aucune plante, car celles-ci ayant besoin de lumière, restent confinées au voisinage de la surface. Les yeux des animaux benthiques profonds sont en général dégénérés à cause de l'obscurité où ils demeurent ; en revanche leurs organes tactiles sont puissamment développés ; l'adaptation aux conditions principales du milieu, l'obscurité et l'absence de courants s'effectue. Presque toujours les espèces sessiles à l'état adulte font partie du Benthos vagile pendant leur jeunesse, telles les spores des algues, les œufs des coraux, des bryozoaires, des actinies, les larves d'echinodermes.

Le Nekton est l'ensemble des animaux vivant à toutes les profondeurs et se mouvant de leur propre gré comme la plupart des poissons, des reptiles et des cétacés. Le passage n'est souvent pas très net entre le Nekton, le Benthos vagile et le Plankton constitué

par les êtres qui flottent dans l'océan indépendamment de leur volonté, livrés sans résistance aux conditions physiques et mécaniques de la mer. Au nombre des éléments principaux du Plankton, on citerait des diatomées, les noctiluques, globigérines, radiolaires, copépodes, ptéropodes, les salpes, les œufs de poissons et même certains petits poissons.

Le Plankton possède une flore et une faune ; la flore est constituée par des spores d'algues vertes, blanches, rouges ou jaunes. Les sargasses arrachés aux rochers des Antilles et du golfe du Mexique, entraînés par le Gulf-Stream et accumulés dans la partie centrale calme du circuit, à l'ouest des Açores, sont du Benthos devenu Plankton.

Les animaux planktoniques ont le corps transparent, hyalin, afin d'être moins aperçus par leurs ennemis ; leur tissu renferme jusqu'à 98 p. 100 d'eau de manière à ce que leur poids spécifique soit à peu près identique à celui du liquide au milieu duquel ils flottent et qu'ils puissent suivre encore plus aisément les mouvements des flots. Leur squelette, s'ils en possèdent, offre une surface maximum pour une masse minimum. Le Plankton se divise en Plankton pélagique qu'on rencontre en haute mer, Plankton bathybique errant dans la profondeur et enfin Plankton intermédiaire. Cependant les différences n'ont véritablement et ne peuvent avoir de limites tranchées pas plus d'ailleurs que l'eau elle-même parcourue par des courants qui tantôt l'entraînent dans les profondeurs et tantôt la forcent à revenir vers la surface. En général, de jour, le Plankton s'enfonce jusqu'à 200 mètres environ et, la nuit, il remonte. On croirait que son coefficient de dilatation légèrement inférieur à celui de l'eau de mer lui fait laisser la place aux eaux chauffées par le soleil pendant le jour et le ramène à la surface avec les couches plus froides et moins concentrées par évaporation pendant la nuit. Le Plankton bathybique habite le fond et ne s'élève guère qu'à une centaine de mètres au-dessus.

La connaissance des lois qui régissent la distribution du Plankton est le problème capital de l'industrie rationnelle des pêches. La plupart des nations maritimes se livrent au dosage régulier du

Plankton dans leurs mers. Le Plankton est suivi dans ses navigations par des troupes d'animaux qui s'en repaissent; ces derniers sont suivis à leur tour par des poissons carnivores et ceux-ci sont pourchassés par les pêcheurs. Comme le Plankton qui mène la marche est à la merci des conditions physiques et mécaniques de la mer, on comprend que ce soit en définitive celles-ci dont l'économie est la loi des pêches. On parle beaucoup des migrations des harengs ou des sardines; elles sont les mêmes que celles du Plankton dont parlent peu de personnes et qui sont la conséquence fatale des variations des courants, de la température ou de la densité des eaux dont personne ne s'occupe.

CHAPITRE III

LA CHIMIE DE LA MER

Le caractère le plus frappant relatif à la constitution intime, à la composition chimique de l'eau de la mer, est sa saveur à la fois salée et amère. La cause ne fut certainement ni longue ni difficile à découvrir : il suffisait d'observer et de goûter dans le creux des rochers, les croûtes salines que laissent les embruns des vagues lorsqu'ils s'évaporent pendant l'été. La cause seconde, la provenance même de ce sel, était moins évidente. Aujourd'hui la géologie nous apprend qu'il résulte de la condensation et de la dissolution des composés salins encore en vapeurs dans l'atmosphère ou peut-être même déjà déposés à l'état solide sur la croûte initiale terrestre au moment de l'apparition des premières eaux. Le premier océan fut salé. A ces corps s'ajoutèrent tous ceux que, dans la suite des temps, les eaux dans leur cycle éternel de mouvement, enlevèrent par lavage aux roches refroidies de l'écorce du globe et concentrèrent dans le lit océanique d'où ils sont destinés à ne jamais sortir. Or aucun corps n'est absolument insoluble. Mais cette explication ne pouvait résulter que des progrès ultérieurs de la géologie et de la chimie. Les savants de l'antiquité et du moyen âge la cherchèrent et, fait assez curieux, malgré son extrême complexité, c'est une des questions pour lesquelles ils s'éloignèrent le moins, dès le début, de la vérité.

Pline l'Ancien, dans son *Histoire naturelle* admet en effet que « la mer reçoit du soleil une saveur salée, soit que la force ignée « en attire les parties douces et ténues qui sont les plus faciles à « enlever et laisse ce qui est plus âpre et plus épais de sorte que

« l'eau profonde est plus douce que l'eau de la surface, soit que le « mélange des vapeurs acides produise cet effet, soit que la terre, « par sa nature, gâte le goût des eaux de la mer comme elle gâte « celui des eaux médicinales. »

Neuf siècles plus tard, en 915, on retrouverait les mêmes idées chez le géographe arabe Maçoudi qui appuyait davantage encore sur la continuité de la circulation de l'eau par évaporations et condensations successives ainsi que sur les résultats du lavage des terres tendant à une concentration des matières solubles dans les eaux marines.

A la fin du XVIIe et au commencement du XVIIIe siècle, la question préoccupe de nouveau les géographes et les savants; elle demeure impossible à résoudre parce qu'elle est d'ordre chimique et que la chimie n'existe pas encore. En 1667, Hooke invente sa bouteille à recueillir les échantillons d'eau et la même année, Boyle écrit son petit traité *de Salsedine maris* dans lequel il expose ses tentatives d'explication. En 1672, Varenius reprend l'idée ancienne et cherche moins à la modifier qu'à déduire ses conséquences au point de vue de l'histoire des phénomènes intéressant l'économie actuelle du globe. Il admet que l'évaporation étant plus active dans les régions chaudes que dans les régions froides, la mer doit être plus salée vers l'équateur que vers les pôles, abstraction faite des modifications locales ou temporaires dues aux chutes de pluie ou de neige et à l'apport des fleuves. La présence du sel en proportions plus ou moins considérables fait varier le poids spécifique et le point de congélation des diverses eaux de mer.

Marsigli, vers 1700, pour découvrir la composition de l'eau de mer, fait appel à tous les caractères susceptibles de le mettre sur la voie de la vérité. Il exécute de nombreuses mesures aréométriques en Méditerranée et recueille lui-même à la surface et en profondeur, des échantillons d'eau qu'il analyse ensuite. Il remarque leurs variations de composition. Il ne néglige aucune précaution pour obtenir plus de précision et devine presque la chimie avant que la chimie n'existe. Il constate la basicité de l'eau de mer, ce qui est déjà un résultat important, soupçonne le cycle qu'y accom-

plissent les gaz et principalement l'azote sous forme d'ammoniaque; enfin il reconnaît que cette eau possède avec une onctuosité particulière, une saveur en même temps salée et amère. C'est la cause de cette dernière que nous savons aujourd'hui être la magnésie, qu'il ne parviendra pas à découvrir malgré tous ses efforts. Pourtant il imagine les procédés les plus rationnels, il procède par analyse et par synthèse bien qu'il fasse plutôt de l'alchimie que de la chimie. Il se sert tour à tour de l'aréomètre et de la balance; il évapore, calcine, pèse; il examine même au microscope ; il observe la façon dont se modifie, selon le cas, la nuance de l'eau de fleurs de mauves ajoutée à l'eau de mer ; il essaie l'effet de l'esprit de sel ammoniac, de l'huile de tartre : il n'oublie pas même les réactions qu'on pourrait appeler culinaires, car il cherche la manière dont s'y cuisent les légumes. Il tâche aussi de fabriquer artificiellement ce liquide qu'il sait être si complexe en dissolvant diverses substances dans de l'eau de pluie. L'origine de la saveur amère lui échappe toujours. Il constate que le sel ordinaire dissous est impuissant à la donner, devine la présence de la matière organique et finit par attribuer cette saveur a un mélange « d'esprit de charbon de pierre, sorte de carabbe ou de bitume ».

Dès que les notions générales de chimie se précisent, à la fin du XVIIIe siècle, on est en état d'agir méthodiquement et les progrès commencent à s'effectuer. Tant il est vrai qu'il est impossible à un homme, quel que soit son génie, de prendre une trop grande avance sur le reste de l'humanité. Quand il se borne à faire seulement quelques pas en avant, l'humanité sent tellement bien qu'il accomplit un acte subversif, qu'elle le châtie en le persécutant pendant sa vie et en s'efforçant de l'oublier après sa mort.

Bergmann analyse en 1779 différents échantillons d'eaux de mer; il reconnaît la diversité de leur composition aussi bien qualitativement que quantitativement. Les méthodes d'étude sont perfectionnées en 1818 par le Dr John Murray d'Edimbourg et les conclusions auxquelles on parvient sont confirmées par Marcet en 1822.

Le savant qui a le mieux compris le rôle de la chimie dans l'his-

toire de la terre en général et dans celle de la mer en particulier, est Mohr, le chimiste éminent, le véritable propagateur pour ne pas dire le créateur des méthodes d'analyse chimique par les liqueurs titrées. Peut-être pour ce motif est-il assez mal vu des géologues et beaucoup trop inconnu en France, au plus grand dommage de la géologie qui, en ce moment, rompt de plus en plus avec les anciens errements et entre enfin dans sa phase de science rigoureuse analytique et synthétique. Mohr a commis plus d'une erreur; c'est le prix dont se paie la découverte de la vérité de même que c'est en tombant que l'homme apprend à marcher ; il a été aggressif et il eut l'imprudence d'exprimer sa façon de penser avec toute la netteté qu'il mettait au service de ses expériences. Il oublia que les ménagements sont d'autant plus indispensables qu'on a davantage raison ; mais le métier d'homme de talent est si pénible qu'on peut plaider en faveur de Mohr les circonstances atténuantes, surtout maintenant qu'il ne vit plus et par conséquent n'est plus dangereux pour personne. Je n'ai à considérer ici que son ouvrage intitulé *Geschichte der Erde* dont il publia une première édition en 1866 et un peu plus tard une seconde. La première est particulièrement importante, parce que l'auteur s'y montre véritablement lui-même avec ses défauts et ses immenses qualités de précision, de largeur de vues, d'ingénieuse originalité et d'audace. La lecture en est infiniment instructive et en même temps amusante. On sent qu'il n'a pas exprimé la moitié de ce qu'il pensait et qu'il n'ignorait pas que cette moitié était encore trop pour ne pas soulever des colères. Il a eu l'idée de mettre à la fin de son livre, sous forme de thèses numérotées, en latin comme c'était alors l'usage en Allemagne, les conclusions auxquelles il était parvenu. Heureux seraient les gens de science, littéralement écrasés sous le poids des publications, si les auteurs, à l'exemple de Mohr, résumaient encore en quelques mots la quintessence de leurs travaux. Je ne puis résister au plaisir de copier quelques-unes de ces thèses qui concernent spécialement la chimie de la mer. Je les laisse en latin et je bornerai mes citations afin de me faire pardonner mon admiration pour Mohr.

23. *Mare est atmosphæra quædam omnia continens ad vitam plantarum et animalium necessaria.*

26. *Quidquid calcariam carbonicam in mari producit est animal ; montium calcareorum formatio sempiterna est et adhuc viget.*

35. *Acidi phosphorici circulatio est ex aqua marina per animalium incrustationes in saxa calcarea, et inde in terram, montes, solum agreste et per fluvios reditus in mare.*

36. *Fluorium, satelles acidi phosphorici, ex aqua marina per montes calcareos in terram dissipatur.*

38. *Magnesia omnis ex chlorido magnesico et sulphate magnesico aquæ marinæ derivanda.*

39. *Sulfur et sulfuris combinationes in terra ad gypsum marinum referuntur.*

83. *Non est neque minerale neque saxum quod dissolutioni in infinitum resistat.*

85. *Hodierni temporis terra geologiam docet prœteriti.*

95. *Chemia in rebus chemicis explicandis dux et magistra, et neglecta in geologis celeberrimis graviter vindicata est.*

Le danois Forchhammer commence en 1865 ses travaux rigoureux sur la composition chimique de l'eau de mer et les continue sans interruption pendant vingt et un ans. Quoique en possession de procédés de dosage très précis, ses premières analyses sont rendues difficiles par le manque de soin des marins qu'il charge de lui rapporter des échantillons d'eaux récoltés en une foule de points différents de la surface de l'océan. Il n'essaie pas de se livrer à des analyses complètes de tous les éléments contenus ; il se contente avec raison de doser exactement quelques-uns d'entre eux, le chlore, l'acide sulfurique, la magnésie, la chaux, la potasse et, par différence, la soude. Sa conclusion est que bien que la salinité de l'eau de mer puisse varier entre certaines limites, cependant si les échantillons sont pris au large, loin du voisinage de la terre et de l'embouchure des grands fleuves, la proportion de chaque élément constituant par rapport à la quantité totale des sels est partout la même. Les faibles différences relevées pro-

viennent surtout de variations dans le degré de dilution et de concentration.

Cette opinion est devenue inexacte. Ainsi que le démontrent les mesures de densités comparées à des dosages très précis d'un ou de plusieurs des éléments de l'eau de mer, le total des halogènes, par exemple, ou la teneur en acide sulfurique, une eau ne saurait être considérée comme de l'eau distillée contenant en dissolution une proportion plus ou moins considérable d'un même mélange de divers sels. Les différences ne sont pas énormes, mais heureusement elles existent et, grâce à elles, on possède un procédé permettant de suivre une même eau dans son mouvement à travers la masse océanique, tout comme l'anatomiste suit avec son scalpel et jusque dans ses plus délicates ramifications le trajet d'une veine ou d'une artère dans le corps humain. La loi générale de la circulation océanique s'établira à l'aide de coupes horizontales successives à travers l'océan qu'on comparerait encore aux sections parallèles pratiquées au microtome transversalement le long du corps d'un animal mou et qui, méthodiquement examinées au microscope, laisseront découvrir l'anatomie entière de cet animal.

L'étude chimique de l'eau de mer est encore abordée par Frémy en 1837 qui analyse les échantillons rapportés du voyage de la *Bonite ;* par Morren (1843) qui étudie des eaux provenant de Saint-Malo ; par Hayes en 1851, Pisani en 1855, Bischof en 1863, Carpenter en 1869, Buchanan en 1878, Roth en 1879. Tornöe et Schmelck s'occupent des échantillons du *Vöringen* en 1878 et Dittmar en 1884, de ceux du *Challenger.*

En même temps avaient lieu des recherches s'appliquant à une propriété spéciale de l'eau de mer. Usiglio en 1849, cherchait l'ordre dans lequel apparaissent à l'état solide, pendant l'évaporation, les divers sels dissous, question importante pour l'industrie des marais salants et qui aurait peut-être besoin d'être reprise aujourd'hui. Balard découvrait en 1826 le brome dans les eaux-mères de ces marais salants et Courtois, en 1811, l'iode dans celles des soudes de varechs. Bouquet de la Grye en 1882 dosait les halogènes. Enfin Dieulafait, de 1877 à 1880, imaginait une série

de procédés extrêmement délicats par lesquels il réussissait à doser des traces infinitésimales de corps tels que le bore, la lithine, le cuivre, le zinc et le manganèse contenus en très faible quantité dans l'eau de mer et il appliquait ses recherches à des considérations géologiques du plus haut intérêt.

Aimé n'aborda qu'une fois l'étude de questions touchant à la chimie de la mer en 1845. Il le fit avec l'ingéniosité et la précision si remarquables dans toutes ses œuvres. Il étudia les gaz dégagés par les plantes marines et reconnut qu'ils se composaient d'un mélange d'oxygène et d'azote en proportions variables « selon l'heure, l'état du ciel, la saison et problablement aussi la latitude du lieu où l'on se trouve ». La lumière était la condition essentielle de leur dégagement. C'est, on le voit, le mécanisme de la respiration des plantes. Les expériences ont été reprises par M. Knudsen en 1897 qui les a appliquées au plankton recueilli par l'*Ingolf* dans les parages de l'Islande. Elles l'ont amené à reconnaître que tout au contraire du plankton animal qui absorbe de l'oxygène et expire de l'acide carbonique, le plankton végétal obéissant aux mêmes lois que les autres plantes marines, sous l'influence de la lumière, fixe de l'acide carbonique et expire de l'oxygène tandis que l'inverse a lieu pendant la nuit. Il est admis qu'un être vivant d'organisation élevée a besoin, par jour de 6 500 centimètres cubes d'oxygène par kilogramme de son poids. Cette quantité est moindre pour un animal inférieur.

Les gaz contenus dans l'eau de mer appelèrent aussi l'attention. Léwy les avait déjà analysés en 1846, mais Jacobsen se livra plus spécialement à ces recherches en 1872, dans la mer du Nord, à bord de la *Pommerania* où il se servit d'un système spécial pour recueillir ces gaz et les analyser. Ces travaux furent repris par Dittmar, puis par Tornöe et Schmelck.

La condition indispensable pour se livrer à l'étude chimique d'un échantillon d'eau de mer est de posséder une prise d'essai récoltée à une époque et à une place parfaitement déterminées, à la surface ou à une profondeur connue et garantie pure du moindre mélange d'eaux différentes. On prendra en même temps un élément essen-

tiel pour les considérations auxquelles donnera ultérieurement lieu l'analyse, la température *in situ* de cette eau.

Quand on ne doit s'occuper que d'eaux de surface, on se bornera à la puiser dans un seau et à la verser dans un flacon de verre préalablement rincé avec un peu de la même eau et conservé bien bouché à l'émeri ou avec un bouchon de liège paraffiné. Le liquide se conserve parfaitement dans ces conditions. On réunit dans des caisses à parois doublées de feutre épais pour éviter la casse et qui contiennent au moins quinze de ces flacons maintenus isolés les uns des autres par des planchettes percées de trous. Pour le puisage, on se place de façon à éviter de recueillir une eau souillée par les malpropretés du bord en se rappelant qu'un bâtiment de fort tonnage, même immobile au milieu de l'océan, provoque par sa seule présence, surtout s'il est à vapeur et donne de temps en temps quelques tours d'hélice pour se maintenir en position, des remous qui mélangent les eaux réellement superficielles avec celles d'une profondeur de cinq ou six mètres, au moins. S'il s'agit d'obtenir des échantillons bien superficiels ou d'une faible profondeur, il faudra opérer dans une embarcation mouillée ou dont les avirons auront été rentrés.

Pour récolter des eaux profondes, on a imaginé un grand nombre de systèmes de bouteilles. Le plus simple est une bouteille quelconque, en verre, ayant par exemple contenu du vin ou de l'eau minérale, qu'on ferme par un bouchon à demi enfoncé dans le goulot, retenu par une cordelette tenue lâche et dont l'extrémité est fixée à la bouteille elle-même. Celle-ci est suspendue à une ligne de sonde et lestée avec un poids en plomb. Ce système, facile à installer, étant descendu à quelques mètres seulement au-dessous de la surface, car il ne saurait évidemment être question de profondeurs plus grandes, on lui communique une secousse violente au moyen de la ligne. Le bouchon se détache, la bouteille s'ouvre, se remplit et on la remonte immédiatement sans qu'il se soit produit de mélange sensible avec l'eau des couches sus-jacentes.

Pour des profondeurs plus considérables, on emploie la bouteille de Mill ou celle de Buchanan qui sont descendues ouvertes au

point où l'on désire recueillir l'échantillon et dont on provoque la fermeture au moyen d'un messager envoyé d'en haut ou par une légère remontée si l'appareil porte une hélice Magnaghi. Tantôt, comme pour celle de Mill, la bouteille est constituée par une enveloppe métallique cylindrique ouverte à ses deux extrémités afin qu'à la descente l'eau la traverse de part en part et qui effectue une fermeture hermétique en retombant sur ses bases, portées l'une et l'autre par un axe unique et maintenues un peu en dessous. La bouteille de Buchanan est un cylindre creux pourvu d'un robinet à chacune de ses extrémités, qu'on descend ouvert et qu'on ferme au moment convenable par l'envoi d'un messager.

M. O. Pettersson, de Stockholm, a inventé une bouteille isolant un échantillon au sein de la masse d'eau à étudier, quelle qu'en soit la profondeur. Elle est revêtue d'une double paroi couverte elle-même de substance isolante très épaisse qui, au dire de son inventeur, permettrait d'affirmer, après la remontée, la lecture des thermomètres qui y sont renfermés à une fraction de degré bien inférieure au dixième, à un centième de degré ou moins encore. Cet appareil est très lourd et très coûteux, deux très graves inconvénients. La bouteille du Dr Richard offre au contraire toutes sortes d'avantages.

Il importe en effet, lorsqu'on recueille des échantillons d'eau, non pas d'en posséder un seul pris à une certaine profondeur, mais d'en obtenir toute une série verticale dont chacun soit aussi rapproché que possible du précédent. On aura à comparer les caractères des échantillons de cette série avec ceux des échantillons appartenant à une autre série verticale voisine afin d'en conclure l'équilibre des couches d'eau entre les deux localités étudiées sur toute l'épaisseur de l'océan. Nous verrons dans la suite que la densité fournira les caractères dynamiques des couches, c'est-à-dire la direction et la vitesse de leur mouvement, tandis que les caractères chimiques ou du moins certains d'entre eux judicieusement choisis, donneront la personnalité statique de l'échantillon. Ces considérations seront mieux comprises lorsque nous nous serons occupés de la densité et des propriétés physiques de l'eau de mer. Le peu que nous avons

dit suffit cependant pour montrer qu'il importe d'avoir au même moment, sur le même fil de sonde, un nombre d'échantillons aussi grand que possible. Il y a donc avantage à se servir de bouteilles très légères, puisque le volume d'eau recueilli n'a qu'une importance secondaire, pourvu qu'il soit suffisant pour les essais analytiques. La bouteille du Dr Richard répond à ces données : elle est légère, de construction simple et par conséquent peu coûteuse ; elle porte un thermomètre à renversement ordinaire et elle ramène un volume d'environ 300 centimètres cubes d'eau avec lesquels on procède à un rinçage du flacon, on exécute une mesure de densité et des dosages quantitatifs de l'ammoniaque libre, de l'ammoniaque albuminoïde, des halogènes et de l'acide sulfurique. Si, toutefois, pour des recherches spéciales, on avait besoin d'un volume plus considérable de liquide, on emploierait la bouteille de Buchanan ou même, si l'on n'était pas effrayé par son poids et surtout par son prix, celle de Pettersson. Comme toujours, le choix des instruments et des méthodes est commandé par le but que l'on se propose et il serait aussi absurde de chercher à mesurer au dixième de millimètre la distance entre deux villes que d'effectuer les mesures linéaires d'un dessin au moyen d'une chaîne d'arpenteur.

La propriété de l'eau de mer, tenant à sa constitution même, la première à constater, est sa basicité. Il suffit d'ajouter quelques gouttes de réactif coloré, teinture de tournesol, solution alcoolique de coralline, aurine ou phénolphtaléine, pour observer immédiatement le changement de couleur qui pour chacun d'eux est caractéristique de l'alcalinité.

L'eau douce continentale est acide et contient toujours une proportion relativement considérable d'acide carbonique. Il en résulte une importante conséquence au point de vue de l'économie générale du globe. L'eau continentale acide dissout mieux les carbonates que les silicates, tandis qu'au contraire, l'eau de mer dissout mieux les silicates. Les carbonates, amenés en quantités énormes dans le bassin océanique, y servent — et surtout le carbonate de chaux, le plus abondant de tous — à la nutrition des végétaux et des animaux à enveloppe calcaire, algues, foramini-

fères, mollusques ou crustacés. Les silicates y arrivent en grains très fins que l'eau de mer dissout et leur silice servira à la flore et à la faune siliceuses, diatomées, radiolaires ou éponges. Des êtres occupant le rang le plus infime, ainsi que l'ont prouvé les expériences de Murray et Irvine, décomposent donc les silicates dissous ou même, comme l'argile, simplement en suspension dans l'eau, s'en assimilent la silice et l'isolent, effectuant par leur seule force de vie une opération à laquelle nous ne parvenons, dans nos laboratoires, qu'en faisant appel à toutes les ressources matérielles de nos creusets et de nos réactifs.

L'eau de mer contient en dissolution des sels, des gaz et des matières organiques.

En entrant dans le détail des faits relatifs à la composition chimique de l'eau de mer, il convient d'établir, dès le début, que celle-ci, dans tout l'océan, à la surface et dans ses profondeurs, n'est pas partout chimiquement identique à elle-même. On ne saurait considérer des échantillons pris dans des localités éloignées les unes des autres comme de l'eau distillée à laquelle on aurait ajouté un poids plus ou moins grand d'un même mélange de sels. Les proportions de ces sels varient, il est vrai, entre de faibles limites, mais ces différences, si légères qu'elles soient, ont des conséquences capitales sur l'économie de l'océan. On est donc obligé de juger de grandes choses d'après de petites et cet inconvénient, malheureusement inévitable, est une réelle difficulté des études de chimie et de physique océanographiques.

Comme il importe d'avoir un type moyen dont — il faut se hâter de le dire, — les échantillons particuliers s'écarteront toujours plus ou moins, nous donnerons la composition en poids des sels contenus dans 1 000 grammes d'un échantillon d'eau de l'Atlantique.

Chlorure de sodium NaCl	27,3726
Chlorure de potassium KCl	0,5921
Chlorure de rubidium RbCl	0,0190
Sulfate de chaux $CaSO_4$	1,3229
A reporter	29,3066

Report	29,3066
Sulfate de magnésie $MgSO_4$	2,2437
Chlorure de magnésium $MgCl^2$	3,3625
Bromure de magnésium $MgBr_2$	0,0547
Métaphosphate de chaux CaP_2O_6	0,0156
Bicarbonate de chaux CaC_2O_5	0,0625
Bicarbonate de fer FeC_2O_5	0,0026
Silice SiO_2	0,0149
	35,0631

Si on calcule la proportion de chaque sel en centièmes du total des sels, on trouve :

Chlorure de sodium	78,6 pour 100.
Chlorure de magnésium	9,6 —
Sulfate de magnésie	6,5 —
Sulfate de chaux	3,7 —
Chlorure de potassium	1,8 —
Bromure de magnésium	0,2 —
Bicarbonate de chaux	0,1 —

Deux éléments jouent un rôle particulièrement important, le total des halogènes, c'est-à-dire du chlore, du brome et de l'iode et l'acide sulfurique. La proportion des premiers pour 1 000 parties en poids d'eau de mer varie entre 19 gr. 05 et 21 gr. 38 environ, tandis que la proportion de l'acide sulfurique est comprise entre 2 gr. 27 et 2 gr. 34, selon les échantillons.

En réalité, la mer tient en dissolution tous les corps simples, car elle est alimentée par l'eau des pluies, des sources et des fleuves ayant ruisselé sur les continents et en ayant lavé les masses. Or tous les corps, quels qu'ils soient, sont solubles dans l'eau. Nous avons vu que Dieulafait y avait découvert du bore, de la lithine, du cuivre, du zinc et du manganèse, mais on y a reconnu en outre la présence de l'iode, du fluor, de l'aluminium, du baryum, du strontium, du césium, du nickel, du cobalt, du plomb, de l'arsenic, de l'argent et de l'or. Ces éléments se trouvent à l'état de combinaisons diverses qu'il est difficile de préciser, car si les procédés de l'analyse permettent d'obtenir la quantité de chaque corps simple

contenu dans l'eau, rien n'autorise à affirmer quels modes particuliers de combinaisons ceux-ci affectent entre eux. Il est intéressant de constater la concentration de certains de ces éléments. Le sol des grandes profondeurs est semé de nodules manganésiens, concrétions d'oxydes de fer et de manganèse autour d'un débris organisé. Des végétaux et des animaux possèdent le pouvoir de concentrer dans leurs tissus un corps simple particulier ; le bore se retrouve dans les cendres de la *Zostera marina* et du *Fucus vesiculosus ; Pocillopora* et *Heterospora* accumulent dans leurs tissus le cuivre, d'autres le plomb ou le zinc. C'est dans les cendres de plantes marines ou dans les incrustations des chaudières à vapeur que les chimistes vont chercher les corps rares.

L'étude de ces concentrations n'a pas été considérée avec le soin qu'elle mérite et peut-être la chimie analytique de l'avenir aura-t-elle profit à se montrer moins dédaigneuse. Il s'agit d'admettre le réactif-vie au nombre des réactifs chimiques au même titre que l'acide oxalique pour déceler la chaux ou le chlorure de platine pour la potasse. Si, par exemple, le calcaire, au lieu d'être si répandu dans la nature, était un minéral rare, le plus simple moyen de se le procurer ne consisterait-il pas à laisser des coquilles concentrer le carbonate de chaux en dissolution dans les eaux et, la réaction étant accomplie, à recueillir le produit ayant pris naissance ? C'est d'ailleurs le procédé employé en Cochinchine et dans les îles de corail où la chaux indispensable aux constructions est obtenue par la calcination de coquilles. Le réactif vivant possède parfois une délicatesse dépassant de beaucoup celles des réactifs inorganiques. Des traces plus qu'infinitésimales, indiscernables par les procédés analytiques les plus sensibles, de cuivre ou d'argent, suffisent pour arrêter le développement de certaines algues ou les faire immédiatement périr si ces métaux sont introduits après coup dans l'eau où elles ont végété.

L'eau de mer contient de l'air atmosphérique, c'est-à-dire un mélange d'oxygène et d'azote, de l'acide carbonique et, en faible proportion, de l'hydrogène sulfuré.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau étant plus élevée que celle

de l'azote, alors que dans l'air atmosphérique le rapport de l'oxygène à l'azote est de 21 parties de l'un pour 79 de l'autre, il est de 35 à 65 dans l'eau douce, d'après Dalton et de 33,9 à 66,1 dans l'eau de mer, d'après Jacobsen. Les deux dernières valeurs sont des moyennes comprises entre 36,1 et 33,6 d'une part et 65,9 et 66,4 d'autre part, comme limites extrêmes. La variation de la quantité d'azote avec la profondeur est insignifiante parce que ce gaz est inerte et ne semble jouer aucun rôle dans l'économie océanique. Il en est autrement de l'oxygène qui subit d'assez fortes variations et passe de 35 ou 36 à 28, 24, 16 et même 11 p. 100. Ces différences s'expliquent par les oxydations qui se produisent dans les matériaux du sol sous-marin et par la respiration des êtres vivants qui, groupés en nombre plus ou moins considérable, selon la localité, suivent sous les eaux, flore ou faune, les mêmes lois que dans l'atmosphère gazeuse continentale. Ainsi qu'il résulte des recherches d'Aimé et plus tard de Knudsen, les animaux aspirent de l'oxygène et expirent de l'acide carbonique comme le font les plantes pendant la nuit tandis qu'à la lumière, celles-ci, au contraire, aspirent l'acide carbonique et expirent l'oxygène.

L'eau de mer absorbe l'air atmosphérique avec lequel elle est en contact, en plus ou moins grande quantité selon la température. L'eau froide en prend plus que l'eau chaude de telle sorte que 1 000 volumes d'eau de mer absorbent 24,7 volumes d'air à zéro, 18,5 à 13 degrés et 17 seulement à 20 degrés.

On a longtemps pensé que, dans les profondeurs, les gaz devaient être dissous sous une pression énorme correspondant à autant d'atmosphères qu'il y a de fois 10 mètres environ dans la distance comprise entre la surface et le point considéré. Aimé a prouvé expérimentalement qu'il n'en était rien et que, quelle que soit la profondeur, l'air ne se trouvait qu'à la pression atmosphérique. Pour mieux faire comprendre sa pensée, il comparait un liquide à une roche bourrée de canalicules tous en connexion avec la surface et par conséquent avee l'atmosphère. La couche profonde d'eau de mer est dans la condition d'une brique qui, placée à la base d'un édifice, supporte, il est vrai, sur sa masse la pression de

tout l'édifice situé au-dessus d'elle mais dont les pores restent toujours remplis d'air à la pression même de l'atmosphère avec laquelle ils ne cessent pas de rester en communication. Ces faits intéressent les conditions de vie des êtres habitant les abîmes. Ils autorisent à diminuer l'épaisseur des bouteilles destinées à recueillir l'eau des profondeurs et qu'on avait d'abord tenues très épaisses afin de leur permettre de résister à la puissante décompression supposée résulter de la remontée à la surface après remplissage et fermeture parfaite. Les expériences d'Aimé ont été reprises au moment de l'expédition du *Vöringen* par le commandant Wille au moyen d'une bouteille de son invention et, plusieurs années après, à bord de la *Princesse-Alice* par le Dr Richard. Elles ont confirmé la loi d'Aimé. La légère effervescence du liquide que l'on avait cru remarquer est due à l'augmentation de volume de l'eau elle-même, conséquence de la décompression au moment de l'arrivée à la surface.

Il importe encore de remarquer que la communication constante avec l'atmosphère de la couche d'eau profonde explique comment est indéfiniment renouvelée la provision d'oxygène nécessaire à la respiration des êtres vivant sur le fond et qui, s'il en était autrement, ne tarderaient pas à la consommer entièrement et, par conséquent, à périr asphyxiés. En supposant le bas d'une colonne liquide aussi haute qu'on le voudra, absolument privée d'air, mais en communication avec l'atmosphère à sa partie supérieure, cette colonne s'aérerait de nouveau par convection de haut en bas et dissolution de l'air de proche en proche. Le phénomène a été parfaitement établi par les expériences de M. Thoulet et plus tard du Dr Regnard.

Le rôle exact de l'acide carbonique dans l'eau de mer est mal connu. Si on veut chasser par l'ébullition l'acide carbonique contenu dans un volume déterminé d'eau de mer, le gaz se dégage d'une façon continue alors même que, tout le liquide étant évaporé, on en est arrivé à calciner une masse solide de sels. Avec de l'eau douce, l'ébullition dégage rapidement tout l'acide carbonique en donnant lieu à une précipitation de calcaire. L'eau de mer traitée

de même demeure limpide. On a attribué le phénomène à la présence dans celle-ci soit du chlorure de magnésium, soit des sulfates. Dans ces conditions, l'acide carbonique est-il à l'état libre ou bien est-il combiné à des bases et particulièrement à la chaux et au fer, à l'état de bicarbonate instable se formant et se détruisant continuellement sous des influences non précisées ? Tornöe admet que chaque litre d'eau de mer contient de 48 à 50 centimètres cubes d'acide carbonique et cette proportion n'éprouverait que de faibles variations avec la profondeur ; elle dépendrait d'abord de la quantité même des sels dissous dans l'échantillon et de la température, de sorte que l'eau serait d'autant plus chargée de gaz qu'elle renfermerait plus de sels dissous et que sa température serait plus basse. Elle serait aussi en relation avec la présence du plankton, surtout animal, dont la respiration exhale de l'acide carbonique qui se dissout dans l'eau environnante.

On ne s'est pas encore préoccupé de la présence de l'acide carbonique libre dans les eaux océaniques en contact avec certaines parties du sol sous-marin. L'existence au fond de l'océan de manifestations actuelles d'activité volcanique est aujourd'hui hors de doute. L'eau alors fortement échauffée provoque dans les profondeurs et souvent même jusqu'à la surface, de violents courants. Il serait étonnant que les dégagements d'acide carbonique, compagnons si constants de l'activité volcanique continentale, manquassent sur le lit océanique. Il y a là une question d'une extrême importance, encore obscure et par conséquent digne de fixer l'attention des chimistes océanographes.

L'acide sulfhydrique est rare dans l'océan. Comme il résulte de la putréfaction des matières organiques, on n'en trouve guère qu'au voisinage des continents ou, sous les tropiques, dans l'eau des marais de palétuviers. En revanche, la mer Noire contient d'énormes quantités de ce gaz. L'eau de surface en est exempte, mais à 183 mètres, il en existe déjà 0,33 cmcb par litre et plus bas, la proportion en augmente régulièrement jusqu'au fond où elle atteint 6,55 cmcb par litre à 2166 mètres. Au-dessous de 200 mètres, la mer Noire est inhabitable pour tous les organismes. On a donné

bien des raisons pour expliquer le phénomène : on a supposé qu'il provenait de l'invasion des eaux méditerranéennes, à la fin du pliocène, au moment de la rupture du Bosphore dans le lac qu'était alors la mer Noire et de la destruction des êtres vivants qui en avait été la conséquence. On l'a également attribué à l'action d'une bactérie. Là encore de nouvelles recherches seraient indispensables.

L'étude précise et complète du rôle chimique que jouent les matières organiques contenues dans l'eau de mer est une des plus compliquées et en même temps des plus importantes de l'océanographie. Elle est loin d'être terminée et les détails encore obscurs ou discutables n'y manquent pas. Au point de vue philosophique, il s'agit du passage de la vie organique à la vie inorganique qui, dans le grand cycle de choses qu'est la nature, relie l'être vivant presque au moment même où il achève son existence, à la roche et inversement, la roche à l'être vivant. La matière organique qui sert à l'alimentation de l'animal produit du carbonate de chaux par sa réaction sur le sulfate de chaux dissous et il résulte du phénomène lui-même une régénération de la combinaison azotée. On conçoit donc le caractère éminemment transitoire, passager et instable de ces combinaisons que détruisent le plus souvent les opérations mêmes exécutées dans le but de les reconnaître dans l'une quelconque des phases par lesquelles elles passent, mais dans lesquelles elles ne persistent jamais.

Les matières organiques se trouvent dans l'eau de mer à l'état de particules excessivement ténues, quoique ayant chacune leur individualité ou bien en dissolution complète. Elles sont apportées dans le bassin océanique par l'eau continentale amenée par les fleuves, elles proviennent des corps vivants des animalcules habitant la mer et plus encore de leurs cadavres, débris innombrables qui subissent les phénomènes de la putréfaction. Si derrière un navire en marche, on immerge un filet de traîne à mailles très fines, on est émerveillé, pour ne pas dire épouvanté, de la quantité de plankton qu'il renferme après un court séjour dans l'eau. On a imaginé des procédés spéciaux dans lesquels nous n'avons pas à

entrer ici pour le dosage quantitatif de ce plankton ; sa reconnaissance qualitative se fait au microscope. Cette étude dépend de la zoologie plus que de l'océanographie.

Les filtrations d'eaux de mer se font à travers des tamis de soie à bluter dont les plus fins sont désignés par le numéro 200 qui signifie que le tissu comporte 200 mailles régulières sur une longueur de 1 pouce soit 21 millimètres. En retranchant l'épaisseur totale des 200 fils, on se rend compte que l'écartement des mailles est bien faible. Quand on y tamise des poussières minérales, on reconnaît que les grains qui les franchissent ont un diamètre inférieur à 0,04 mm. Les matières organiques plus souples doivent s'accrocher aux fils et être arrêtées même si elles ont des dimensions plus petites. Cependant ces mailles sont encore traversées par une telle quantité de matière qu'on est amené à se servir de filtres en papier ou en porcelaine d'amiante. On procède comme pour des filtrations d'air et on fait passer une quantité considérable de liquide dont on concentre les résidus dans une goutte d'eau. J'ai disposé et décrit des appareils pour ces opérations qui ne sont pas sans quelques difficultés. Il serait à désirer qu'elles fussent reprises par quelqu'un habitant sur les bords de la mer. On pourrait aussi travailler en pleine mer, en marche ou sur des bateaux-feux, à l'exemple des savants belges qui se livrent à des dosages continus de plankton, avec des appareils de filtration automatiques et opérant sans interruption.

Le phénomène de l'écume se rattache à la présence des matières organiques dans la mer. L'eau douce pure agitée ne donne pas d'écume. La mousse ne se manifeste que pour des liquides contenant des matières organiques et peut-être la présence de sels dissous est-elle aussi nécessaire. La matière grasse communique à l'eau de mer son onctuosité spéciale, sa saveur et son odeur ; cette huile est probablement saponifiée par l'eau de mer alcaline, de sorte qu'on se trouverait en présence d'une lessive faible d'un savon spécial où l'agitation produirait une mousse plus ou moins abondante et persistante selon diverses conditions telles que la proportion même de matière grasse et la température ambiante, ou plutôt

la différence entre la température de l'eau et celle de l'air. Une théorie de l'écume est à élucider ; c'est un sujet de plus à ajouter à une foule d'autres que comporte l'océanographie. Remarquons à ce propos qu'en présentant au contact de l'air une couche liquide très mince et de surface très étendue, l'écume due aux vagues provoque une oxydation intense, c'est-à-dire une combustion et par suite une destruction de la matière organique. Elle est donc, non moins que le sel dissous qui est antiseptique, un agent d'assainissement des eaux marines. Là où celles-ci restent stagnantes, dans les régions tropicales basses, à l'embouchure de certains fleuves, elles se corrompent, donnent des miasmes pernicieux et transforment la contrée en foyer d'épidémie comme aux bouches du Gange et du Mississipi où sont endémiques le choléra, la peste ou la fièvre jaune.

L'étude de la matière organique dissoute est bien plus compliquée. On entendra par matière organique, considérée chimiquement, un composé complexe contenant du carbone, de l'azote, du soufre et fréquemment du phosphore. Le carbone ne semble avoir aucun rôle essentiel sinon d'être brûlé par oxydation et de donner naissance à de l'acide carbonique. Au contraire celui de l'azote, du soufre et du phosphore est extrêmement important, surtout celui de l'azote qui est l'élément le plus abondant et par conséquent le plus actif.

Pour évaluer la quantité de matière organique dissoute dans un échantillon d'eau de mer, on a proposé de se servir du permanganate de potasse, mais le réactif est capricieux et en outre il oxyde à la fois le carbone et l'azote. Or le carbone ne possédant, ainsi que nous venons de le voir, qu'une importance secondaire, les valeurs globales obtenues avec le permanganate n'offriront pas un intérêt bien particulier. Deux échantillons donnant la même titration pourront être constitués l'un par une faible quantité de matière azotée et une forte proportion de carbone, l'autre au contraire par peu de carbone et beaucoup d'azote. Le premier échantillon au point de vue des phénomènes provoqués sera peu actif, le second le sera énormément.

Avec des échantillons d'eau recueillis pendant la campagne de la *Princesse Alice* en 1901 dans l'Atlantique Nord, principalement dans les parages des archipels des Canaries et du Cap-Vert, j'ai reconnu que la quantité de matière organique dosée par le permanganate évaluée en milligrammes d'oxygène par litre est égale à 29,8 mmg à la surface. Elle décroît ensuite progressivement jusqu'à 700 mètres de profondeur où elle devient égale à 29,2 mmg et reste alors constante jusqu'au fond.

Il s'agit maintenant de savoir sous quelles formes se trouve l'azote dans l'eau de mer. Une portion est à l'état gazeux non combiné et provient non de matières organiques mais d'une dissolution de l'air atmosphérique ; il est inerte, sans intérêt et d'ailleurs nous nous en sommes déjà occupés.

L'azote combiné est à l'état d'ammoniaque libre, d'ammoniaque albuminoïde, de nitrite, nitrate et carbonate d'ammoniaque. Il est seul actif et cependant, d'après Brandt, il ne le serait pas encore entièrement puisque certaines bactéries très répandues dans l'eau de mer s'empareraient de l'azote sous forme de nitrites et d'ammoniaque et le transformeraient en simple gaz dissous. Si cette action était confirmée, elle compliquerait davantage encore un problème qui l'est déjà très suffisamment. Ces bactéries dénitrifiantes joueraient le rôle d'un agent de purification en appauvrissant sans cesse l'océan de sa matière azotée et comme leur action augmenterait d'énergie avec la température, elle expliquerait la richesse croissante en plankton des eaux marines à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur pour se rapprocher des pôles.

L'ammoniaque libre et l'ammoniaque albuminoïde restent donc seules à considérer. Il est douteux qu'elles possèdent sous les deux formes la même activité, mais pour chacune d'elles le dosage est rapide et précis. Pour avoir l'ammoniaque libre, on fait bouillir l'échantillon d'eau de mer avec de la magnésie calcinée, on distille au quart et on titre colorimétriquement au moyen du réactif de Nessler. Quant à l'ammoniaque albuminoïde, on ajoute au reste du liquide ayant servi à l'opération précédente, une solution alcaline de permanganate de potasse, on distille et dans la portion passée,

on dose encore l'ammoniaque avec le réactif de Nessler. Tous les échantillons d'eaux récoltées par le prince de Monaco à bord de la *Princesse Alice* et dont il a bien voulu me confier l'étude ont été analysés de cette façon. La comparaison des résultats obtenus a montré que l'ammoniaque libre est irrégulièrement distribuée dans l'océan ; elle est en général plus abondante dans les 1 000 premiers mètres à partir de la surface que plus bas. Sa teneur est comprise entre les limites de 0,08 mmg. et 0,46 mmg. par litre. L'ammoniaque albuminoïde, un peu plus abondante dans les couches supérieures (0,19 mmg. par litre) se maintient ensuite en proportion assez constante de 0,13 mmg. par litre. Il semble que dans la presque totalité de l'épaisseur des eaux océaniques, il y ait identité de proportion entre la matière organique brûlée par le permanganate et la matière azotée transformable en ammoniaque. Dans ces questions qui mériteraient d'être étudiées de si près et par des chimistes particulièrement compétents, on hésite à énoncer des lois formelles, car dans l'obligation où l'on est d'opérer sur des échantillons conservés depuis un temps variable, on se rappelle que l'eau de mer est un véritable bouillon de culture, qu'elle abonde en matière vivante éminement susceptible de se modifier et l'on se demande avec inquiétude si, dans ce cas, la vérité du laboratoire est bien la vérité de la nature.

Cherchons maintenant le rôle de l'azote ammoniacal.

L'albumine contient, en outre de l'oxygène, de l'ammoniaque à l'état de carbonate et de nitrate, du soufre et de l'hydrogène, ces deux derniers corps se combinant pour former de l'hydrogène sulfuré. Ces divers éléments vont se trouver en présence du sulfate de chaux ; c'est entre eux et lui que s'effectueront les réactions.

Le carbonate d'ammoniaque en présence du sulfate de chaux donnera naissance par double décomposition à du carbonate de chaux et à du sulfate d'ammoniaque.

D'autre part l'albumine se décompose en hydrogène sulfuré et en acide sulfurique qui attaque immédiatement le carbonate de chaux pour reformer du sulfate de chaux. La quantité de calcaire

créé sera l'excédent du carbonate de chaux formé par le carbonate d'ammoniaque sur celui qui a été changé en sulfate par l'acide sulfurique résultant de la décomposition de l'albumine, ou mieux du sulfate d'ammoniaque produit par la décomposition de l'albumine.

L'hydrogène sulfuré s'oxyde et décompose alors les carbonates alcalins et terreux dissous dans l'eau en mer pour former des sulfates en passant par l'intermédiaire de sulfures.

En définitive, il y a création de carbonate de chaux et régénération de sulfate de chaux et de sulfate d'ammoniaque. Cette action est accélérée par l'élévation de la température qui favorise la putréfaction ; elle est ralentie par son abaissement d'où il résulte que les eaux tropicales doivent contenir plus d'ammoniaque que celles des zones tempérées. Il est possible que le carbonate de chaux, au moment de sa formation, soit dans un état qui lui permette de mieux entrer en dissolution dans l'eau ambiante et d'être plus aisément assimilable par les êtres vivants qui en ont besoin pour fabriquer leur coquille ou leur squelette, comme les coraux. Les mers chaudes sont beaucoup plus abondantes en animaux de ce genre que les mers froides.

De même que le soufre présent dans l'albumine dissoute dans l'eau de mer a donné naissance à de l'hydrogène sulfuré, le phosphore produira de l'hydrogène phosphoré. Il se fera des réductions, les sulfates deviendront des sulfures, les phosphates des phosphures, lesquels, par oxydation subséquente, redeviendront des sulfates et des phosphates.

Le rôle du sulfate de chaux explique l'intérêt qu'il y a à doser l'acide sulfurique dans les échantillons, d'autant plus que le dosage en est facile, exact et assez rapide. Nous laissons de côté les innombrables problèmes de chimie auxquels donne lieu l'eau de mer. Au point de vue de l'océanographie pure, son analyse a pour objet principal l'étude si importante de la circulation océanique. Nous verrons que l'état dynamique d'un échantillon au sein de l'océan est donné par sa densité *in situ*, c'est-à-dire à la profondeur qu'il occupe et à la température qu'il possède au moment même où il agit, comparée à la même caractéristique d'un autre échantillon situé

plus ou moins loin du premier. La marche des molécules d'eau, c'est-à-dire le sens et la vitesse des courants marins sera fonction de la densité *in situ* qui deviendra ainsi une caractéristique dynamique. Pour posséder des caractéristiques statiques destinées à faire reconnaître tout le long de son parcours une même eau ou, si l'on veut, l'eau de ce même fleuve qu'est un courant, il sera indispensable de prendre des données en quelque sorte personnelles à cette eau. C'est à quoi serviront le dosage du total des halogènes contenus dans l'échantillon et celui de l'acide sulfurique. La première aualyse s'effectuera par un dosage volumétrique à l'azotate d'argent titré, dans un poids connu d'eau de mer, avec du chromate de potasse comme réactif coloré, la seconde par une précipitation à l'état de sulfate de baryte à l'aide du chlorure de baryum. Ces deux données étant indépendantes l'une de l'autre, n'en caractérisent que mieux les échantillons. Il se peut en outre que par comparaison avec la quantité d'ammoniaque trouvée — troisième caractéristique indépendante — on soit amené à d'intéressantes considérations sur la chimie des fonds, sur la précipitation chimique du calcaire et, secondairement, sur la transformation en roche compacte des masses détritiques plus ou moins caverneuses ou poreuses telles que les amoncellements de débris situés en avant des récifs coralliens.

La présence des bactéries dans les eaux marines se rattache par des liens extrêmement étroits à la chimie de la mer. On commence seulement à aborder l'étude de cette question et il n'est pas douteux qu'elle ne réserve d'importantes découvertes et qu'une foule de transformations chimiques ne soient attribuables à l'intervention de ces infiniment petits. Peut-être leur doit-on la formation de la dolomie par précipitation du carbonate de magnésie au sein des masses d'eaux océaniques anciennes. La putréfaction des matières organiques qui joue un rôle si considérable dans la précipitation du carbonate ou du phosphate de chaux au fond des mers, est due à des bactéries.

Ces algues microscopiques ont été reconnues en nombre considérable dans les vases profondes. Russell en a trouvé au large de

Naples, 24 000 par centimètre cube de vase à 1 100 mètres et Certes jusqu'à 4 570 mètres de profondeur. Il en existe depuis la surface jusqu'au fond, dans toutes les couches intermédiaires ainsi qu'il résulte d'expériences très délicates et exécutées avec une haute précision par MM. Portier et Richard, à bord de la *Princesse Alice*. Quelques-unes sont phosphorescentes et peuvent être cultivées sur des poissons, des céphalopodes et des crabes morts. On a même découvert des bactéries pathogènes dans les vases de la mer Morte qui contiennent 25 pour 100 de sels et dans des vases des limans près d'Odessa qui en ont 5,7 pour 100. La teneur des eaux en bactéries est variable. L'optimum de température paraît être beaucoup plus bas pour les bactéries marines que pour celles d'eau douce. Un très petit nombre de formes seulement sont anaérobies, mais la plupart sont susceptibles de supporter d'importantes variations dans la proportion d'oxygène du milieu ambiant. Elles ne sont aucunement liées à la limite de pénétration de la lumière. Enfin on a remarqué que les bactéries sulfureuses déposent du soufre aussi bien dans l'eau de la mer que dans l'eau douce. La présence du sulfate de chaux dans la mer explique leur abondance dans les golfes et les baies tranquilles où sont accumulés des détritus végétaux ou animaux. C'est ce qui a été observé en particulier sur les côtes danoises où, par places, se décomposent des masses considérables de zostères colorant l'eau en rouge et répandant au loin l'odeur de l'acide sulfhydrique. Le *Weissen Grund* du golfe de Kiel abonde en bactéries sulfureuses.

CHAPITRE IV

LE SOL SOUS-MARIN

Hérodote, près de cinq cents ans avant J.-C., avait déjà remarqué qu'il suffisait aux marins en s'approchant de l'Égypte, de donner un coup de sonde et d'observer l'échantillon de sol sous-marin ramené par le plomb, pour se rendre compte de la distance à laquelle ils se trouvaient de terre. Une profondeur de dix brasses et un fond de vase annonçaient qu'on était à moins de vingt-cinq milles d'Alexandrie. Telle est la première idée du mode de navigation auquel vingt-cinq siècles plus tard, le commandant de Roujoux devait donner en France une si étonnante précision. Christophe Colomb dans un de ces moments de découragement d'autant mieux connus des grands hommes que le reste de l'humanité ne les ignore pas, écrivait que le monde était peu de chose — *el mundo es poco!* — L'histoire montre par des milliers d'exemples que ce peu de chose qui fait tant de bruit, avance en réalité bien lentement.

Polybe (204-122 av. J.-C.) remarque que l'océan est rempli par les sédiments charriés par les fleuves et il essaie d'évaluer le temps nécessaire pour combler le Palus-Mœotis et le Pont-Euxin. Il aurait d'abord fallu savoir quel était le volume de ces deux mers, tâche médiocrement difficile pour la mer d'Azow peu profonde, tandis que pour la mer Noire, il y avait environ dix-neuf siècles à attendre les sondages des Russes. Si le monde marche lentement, les hommes marchent souvent trop vite et la compensation s'établit mal. Strabon observe avec raison que les sédiments apportés par les fleuves à la mer s'y déposent suivant un ordre déterminé, les plus gros près de la côte, les plus fins au loin.

On est étonné des notions intéressant l'océanographie dispersées dans les œuvres de Sénèque le tragique, contemporain de Jésus-Christ. On a cru lire dans ses vers, quand il parlait des siècles à venir, alors que Thulé ne serait plus la dernière terre connue, une allusion à la découverte future de l'Amérique. La prédiction n'est qu'un rêve de poète, ou, comme le disait irrévérencieusement Voltaire qui s'y connaissait « une fleur de rhétorique ». D'autre part il émet une opinion singulièrement exacte lorsqu'il remarque l'action dissolvante de l'eau sur certains minéraux grâce à la présence d'un certain esprit, *spiritus*, — faut-il traduire par le mot gaz ? — qui les laisse se déposer après que lui-même s'est échappé. Ainsi s'expliquent aujourd'hui la dissolution du calcaire par les eaux douces et sa précipitation dans les tufs. Sénèque observe encore les effets de transport par l'eau succédant aux phénomènes d'érosion et le mode de répartition des sédiments sur le fond par les marées et les courants.

Les mêmes effets de transport et de répariition des particules sableuses de diverses grosseurs sont notés par les géographes arabes du moyen âge. L'un d'eux, Al Birouni, qui vivait vers l'an 1000, décrit les îles de corail, donne des détails sur leur forme si caractéristique et constate l'apparition et la disparition de quelques-unes d'entre elles. Au xve siècle, Koopmann et Breusing, auteurs d'un *Hanseatische Seebuch*, dans le but de permettre aux navigateurs de retrouver leur position à la mer, décrivent les diverses natures des fonds de la mer du Nord et y distinguent des vases, des argiles, des sables à grains gros ou petits, gris, noirs ou rouges, des pierres de diverses grosseurs, anguleuses ou arrondies, couvertes ou non couvertes de coquilles. Cette classification, quoique grossière, est purement minéralogique et les auteurs, gens pratiques, en saisissent bien dès le début, toute l'utilité.

L'étude des fonds continue à préoccuper les esprits au xviie siècle. Bien que le P. Kircher (1664) et le géographe Varénius eussent déjà traité le sujet, les investigations se poursuivent. Il est vrai qu'en même temps les philosophes élucubrent leurs rêveries habituelles, toujours prêts à expliquer la nature qu'ils voient au fond

de leur cerveau comme les fakirs d'Asie finissent par contempler la divinité dans toute sa gloire à force de regarder leur nombril. Les explications fournies par eux de la lithologie sous-marine sont pour la plupart de véritables insanités dont il est peu utile de dresser le catalogue.

Marsigli qui, pendant quarante-cinq ans, de 1680 à 1725 environ, fit de l'océanographie et eut l'immense mérite d'en faire en même temps à terre et sur mer, est aussi remarquable en lithologie sous-marine que dans le reste de ses travaux. Ce n'est pas qu'il ait résolu beaucoup de problèmes relatifs à la question, mais il discerna la route à suivre pour parvenir à connaître la vérité. Malheureusement l'outil qui lui aurait rendu tant de services n'existait pas encore ; la chimie dont, par intuition, il soupçonnait les lois n'était pas découverte. D'après lui, le fond de la mer avec ses inégalités de relief est constitué de même que les continents, par des couches géologiques diverses recouvertes « comme l'intérieur d'un tonneau l'est par de la lie ou du tartre », de dépôts sédimentaires. Les uns proviennent d'une réaction chimique de l'eau de mer sur les éléments minéraux, comme le « magiotan » résultant d'une « conglutination au sein même des eaux », les autres d'une simple déposition dépendant des localités et par conséquent variable, comme « la fange, le sable, l'herbe pourrie, le tartre et les conglutinations sablonneuses de terre, coquillages et autres, répartis selon les accidents continentaux car la partie où se trouve le sable fin est toujours celle qui est exposée au flux des rivières ». Marsigli, dans les planches de son *Histoire physique de la mer*, trace des sections de la Méditerranée au voisinage des côtes de Provence et y figure d'une façon différente les divers terrains.

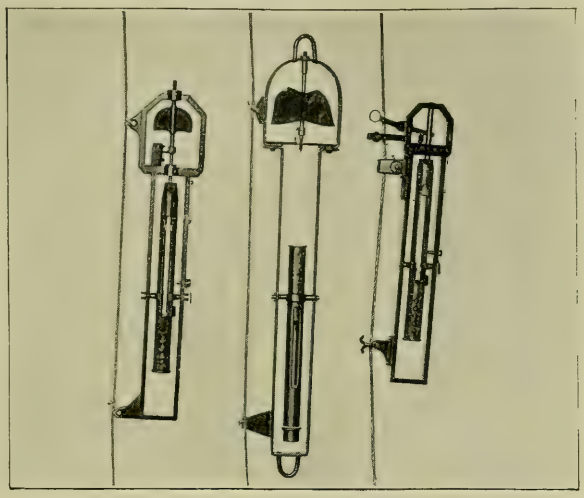
Vers la même époque, des savants italiens font accomplir de réels progrès à la lithologie sous-marine ancienne, c'est-à-dire à la géologie, par l'étude de la lithologie sous-marine actuelle. Baldassari découvre dans les roches terrestres des signes tels que des perforations par des coquilles lithophages et autres qui le conduisent à les considérer comme d'anciens fonds de mer. Lazzaro Moro, en 1740, frappé par les éruptions récentes de Santorin, attribue à

la force volcanique s'exerçant sous la mer la formation de montagnes, de plaines sous-marines et d'îles soulevées au-dessus de la surface des eaux. Beccari en 1729, Bianchi en 1739, Soldani de 1780 à 1797, examinent au microscope les petits coquillages contenus dans divers sédiments terrestres italiens et les comparent, s'ils ne les identifient pas absolument, aux coquilles des sables marins actuels.

Pendant la première moitié du XIXe siècle, l'étude lithologique des fonds marins ne fit pas de progrès. D'ailleurs on n'était en état de se procurer que de petits fonds et c'est seulement après que les systèmes de sondages eurent été assez perfectionnés pour rapporter des échantillons de n'importe quelle profondeur qu'on put s'occuper d'une façon sérieuse de leur composition. Aimé ne prit aucun intérêt à la question et la lithologie sous-marine est la seule branche de l'océanographie au développement de laquelle il n'apporta aucune contribution. Comme les Américains réussirent les premiers à ramener régulièrement des échantillons de fonds, ils furent aussi les premiers à aborder leur étude systématique. Au début, ces échantillons n'étaient guère abondants : on n'en récoltait, pour chaque sondage, que ce qui remplissait quelques tuyaux de plume d'oie placés à la base du tube sondeur à poids déclenché par le système de Brooke. On conçoit combien il était difficile de se livrer à des investigations détaillées sur d'aussi faibles quantités de matière.

Cependant en 1845 et 1847, sir J.-C. Ross ayant rapporté de son expédition dans les régions antarctiques un certain nombre d'échantillons recueillis à la drague, Hooke y avait reconnu la présence d'innombrables frustules de diatomées. Ces débris organisés éveillèrent puissamment l'attention des observateurs, tous zoologistes bien plutôt que chimistes ou minéralogistes, et pendant longtemps, ils ne furent examinés qu'à cet unique point de vue. De temps en temps seulement, on découvre dans les descriptions quelques faits qu'il était en quelque sorte impossible de ne pas noter et dont profite aujourd'hui le lithologiste.

L'américain J.-W. Bailey se distingua dans ces études. Chargé



THERMOMÈTRES DE PROFONDEURS :
MONTURES POUR THERMOMÈTRES A RENVERSEMENT

SONDAGE THERMOMÉTRIQUE : LE THERMOMÈTRE EST FIXÉ
AU FIL DE SONDE

en 1851 et 1856 d'examiner les fonds récoltés par le *U. S. Coast Survey* et en particulier ceux que Brooke avait rapportés des mers du Kamtchatka, il les observe au microscope. Il constate leur richesse en débris animaux et végétaux de foraminifères, diatomées, spicules d'éponges et radiolaires, surtout dans les échantillons pris loin de terre, y reconnaît en outre la présence de poussières volcaniques ainsi que de grains minéraux en proportion d'autant plus grande, au contraire, que l'échantillon provenait d'une localité plus voisine de la terre ; enfin il remarque que les grains de quartz des sondages profonds sont arrondis, tandis qu'ils sont anguleux dans les eaux peu profondes. A cette occasion, plusieurs discussions s'élevèrent. Alors que Maury attribuait les matériaux volcaniques des régions maritimes côtières des États-Unis à un apport de cendres venant des volcans de l'Amérique centrale et des Antilles, Murray, riche de l'expérience que lui avait fourni l'examen des fonds recueillis dans presque toutes les mers du globe durant la longue campagne du *Challenger*, les considérait comme le résultat de la désagrégation des ponces charriées par les courants et des poussières volcaniques répandues en pluie continuelle sur tout le bassin océanique dont elles couvrent le sol.

Les sables verts glauconieux que M. de Pourtalès avait trouvés en 1853 par 150 brasses de profondeur le long des côtes américaines et que Ehrenberg, en 1855, considérait comme dus au remplissage de cellules organiques de foraminifères, firent aussi l'objet de recherches de la part de Bailey. Il signala leur abondance dans certaines régions maritimes, reconnut leur formation actuelle et les identifia aux sables glauconieux des couches géologiques. Une autre discussion fut encore soulevée relativement à la provenance des débris d'êtres organisés accumulés sur le fond. Maury admettait que ces êtres ne vivent qu'à la surface et tombent après leur mort sur le sol ; Ehrenberg ne les faisait vivre qu'au fond et Murray, adoptant une opinion moyenne, les croyait surtout d'origine superficielle quoique une partie eût son habitat sur le fond même. Au total, les travaux de Bailey sont remarquables et tant par eux-mêmes que par les controverses qu'ils suscitèrent,

ils posèrent les premières bases de l'étude détaillée des fonds au moyen du microscope et, quoique incidemment, de la lithologie sous-marine.

Huxley, à propos des organismes rapportés par l'anglais Dayman à la suite de sondages exécutés en 1857, à bord du *Cyclops*, entre 1 700 et 2 400 brasses, dans l'Atlantique Nord, entre Terre-Neuve et l'Irlande, se rangea à l'opinion de Maury au sujet des débris de foraminifères calcaires. Il nia qu'ils eussent jamais été charriés par des courants d'eaux peu profondes dans des eaux profondes ; il y découvrit des coccolithes et affirma que l'ensemble de ces débris formait sur le fond océanique un dépôt identique à la craie ancienne. L'opinion trouva des contradicteurs et, à vrai dire, la question, même aujourd'hui, n'est pas pas encore résolue d'une manière définitive.

Après la mort de Bailey, en 1870, l'observation des 9 000 échantillons recueillis par le *U. S. Coast Survey*, fut reprise par M. de Pourtalès qui crut remarquer que le tracé des courants chauds, au moins le long des côtes américaines, était marqué par un dépôt calcaire, tandis qu'au contraire un dépôt d'organismes siliceux jalonnait le parcours des courants froids. Continuant ses études sur les sables glauconieux, il signala les diverses phases du remplissage des cavités des foraminifères par la glauconie.

A la même époque, Louis Agassiz observait les fonds coralliens situés entre Cuba et la Floride et, appliquant à la géologie ancienne les informations que lui apportait la lithologie des fonds actuels, il affirmait que le sol sous-marin de ces régions était le siège de la formation d'une énorme couche de craie, tandis que sur la portion littorale se créaient des couches calcaires oolithiques. Il admettait en outre qu'aucune formation ancienne n'avait pris naissance en eau très profonde, de sorte que les aires continentales actuelles, jusqu'à une profondeur de 200 brasses, avaient conservé leurs contours depuis les temps les plus reculés et que les continents avaient toujours été des régions d'exhaussement alors que les océans étaient, au contraire, et avaient toujours été des régions d'affaissement.

Dès 1866, Delesse s'occupait, en France, des fonds marins et publiait le résultat de ses études sous le nom de *Lithologie du fond des mers*. Ses observations ne se rapportent guère qu'à des échantillons pris le long des côtes françaises, par d'assez faibles profondeurs ou même sur des plages ; beaucoup de ses analyses, exécutées en trop grand nombre et trop souvent par des mains inexpérimentées, ne méritent pas toujours une confiance absolue. Delesse eut le grand mérite de comprendre l'indispensable nécessité d'une classification non pas zoologique, c'est-à-dire forcément locale, mais purement minéralogique, c'est-à-dire générale, s'appuyant sur une analyse méthodique des sédiments, et de représenter le résultat de ses analyses à la fois mécaniques, chimiques et minéralogiques, sur des cartes de tous points semblables aux cartes géologiques continentales en marquant par une même couleur les fonds de même nature. Il divisa ses fonds en sable, gravier, galets, vase, sable vaseux, vase graveleuse, vase calcaire et arène corallienne. Peut-être ne fixa-t-il pas d'une manière assez précise la dénomination de chacun d'eux, mais il convient de rappeler qu'il n'avait à sa disposition que des échantillons le plus souvent défectueux et n'en possédait aucun de mer profonde. Un autre mérite de Delesse est de s'être servi de ses procédés pour les roches sédimentaires anciennes considérées comme autant de fonds de mer et d'avoir essayé, grâce à leur analyse, de reconstituer la carte des mers géologiques disparues. L'idée de faire de la géologie une paléocéanographie est extrêmement rationnelle et, reprise de nos jours avec plus de suite, de méthode et surtout plus de documents, elle ne peut manquer de conduire à des résultats d'un très haut intérêt. C'est, en définitive, l'avenir de la géologie stratigraphique quittant enfin son allure vague et indistincte pour devenir une science véritablement rigoureuse.

En 1868, paraissait dans les publications du Dépôt des Cartes et Plans de la Marine, un mémoire accompagné de cartes et intitulé *Essai sur l'atterrage et l'entrée de la rade de Brest par temps brumeux avec un bâtiment à vapeur* dont on ne saurait exagérer l'importance. Il était écrit par le capitaine de frégate H. de Rou-

joux, véritable profane en minéralogie, lithologie, chimie et le reste, mais officier d'une valeur scientifique éminente et qui posait les bases de l'application de la lithologie sous-marine à la navigation. Le commandant de Roujoux ignorait tout de la lithologie, probablement jusqu'à son nom, mais combien de savants munis de tous leurs papiers n'échangerait-on pas contre un tel ignorant! La méthode de navigation qu'il invente est simple et infaillible. Elle consiste à dresser d'abord une carte par isobathes de la région, puis, à la même échelle, une carte lithologique du fond. Les deux coordonnées océanographiques, profondeur et nature du fond, obtenues par un seul et même coup de sonde, permettent de fixer immédiatement la position du navire. On s'oriente d'après cette position, on reprend sa route dans une direction connue ; après une certaine marche, on sonde de nouveau, on retrouve sa position et ainsi, petit à petit, de position en position, de changement de direction en changement de direction, même au milieu de la brume la plus intense, en temps de guerre par nuit noire et tous les feux éteints, on s'oriente comme en plein jour et l'on finit par arriver au port ou par en sortir, les yeux fermés. On est frappé de la précision avec laquelle a été dressée la carte lithologique de l'Iroise. Aucun terme technique — et pour cause — et cependant les fonds décrits à faire sourire un technicien sont parfaitement reconnaissables à tous. J'ai étudié les mêmes parages en 1899, c'est-à-dire environ trente ans après le commandant de Roujoux et j'ai constaté d'abord que rien n'était plus facile que de s'y retrouver et ensuite, conclusion plus importante, qu'aucun changement n'avait eu lieu dans la distribution des fonds occupant des parages particulièrement tourmentés au point de séparation de l'Atlantique et de la Manche. Il en ressort cette loi capitale que si la nature d'un fond dépend de l'ensemble des circonstances infinies qui lui ont donné naissance, bien que se modifiant quant aux éléments qui le composent, elle n'en reste pas moins perpétuellement la même par tous ses caractères distinctifs tant que les circonstances ambiantes, considérées dans leur somme, ne se modifient pas. Le petit mémoire du commandant de Roujoux est presque une œuvre

de génie ; l'emploi des sous-marins ramènera l'attention sur lui. Étant donné le nombre de personnes qui s'occupent en France de ces questions, je crains d'être encore pendant quelque temps seul de mon opinion.

A la suite de la campagne du *Challenger*, MM. Murray et Renard publièrent leur magnifique volume *Deep Sea Deposits* qui est le véritable catéchisme de tous ceux qui désirent aborder ces études. On y trouve les plus complets renseignements sur les fonds marins. Malheureusement j'avoue n'en pas goûter la classification un peu hybride qui désigne les fonds par leurs position géographique — côtiers, pélagiques, de mer profonde — leur provenance — terrigènes — leur aspect général déterminé d'ailleurs d'une manière vague par les désignations peu précises de vases, argiles ou boues, leur couleur — argile rouge, argile grise — ou bien la prédominance de tels ou tels débris organisés, animaux ou végétaux, globigérines, radiolaires ou diatomées.

J'adresserai un reproche analogue au travail publié en 1882, de M. Ludwig Schmelck, chimiste des expéditions du *Vöringen* en 1875-77 et 1878. Les renseignements précieux ne manquent pas mais, là encore, on ne trouve aucune classification permettant à un observateur quelconque, minéralogiste, chimiste, zoologiste ou marin, de nommer un fond.

La méthode employée en 1900 par M. Boeggild pour l'examen des fonds rapportés par le bâtiment danois *Ingolf* après ses deux campagnes dans les mers arctiques, offre plus de précision bien qu'elle laisse prise aux mêmes critiques. La classification de l'auteur s'appuie sur la couleur des échantillons, leurs caractères hydrographiques d'être sableux, graveleux ou argileux, sur leur profondeur, leurs caractères zoologiques et lithologiques, leur consistance, leur aspect secs ou humides. Ces caractères sont certainement intéressants, mais leur nombre même favorise la confusion et le degré d'exactitude avec lequel on peut les évaluer est nul. Quand donc un échantillon cessera-t-il, par exemple, d'être sableux pour devenir graveleux ? Comment définir une couleur de manière à la laisser reconnaître sans hésitation et, suivra-t-on

l'auteur lorsqu'il donne ou croit donner le poids exact des éléments volcaniques contenus dans chacun des fonds qu'il examine? Je préfère le mode d'étude dont s'est servi le regretté Konrad Natterer pour les échantillons rapportés par la *Pola* après ses explorations de la Méditerranée orientale, de la mer Égée et de la mer Rouge. Son travail est franchement et uniquement chimique et chacun y peut prendre ce qui lui convient, certain d'avoir affaire à un chiffre obtenu dans des conditions nettement précisées, dont il sera libre de déduire telles conséquences qu'il lui plaira et, qu'en tous cas, il aura le droit de comparer avec la donnée chimique similaire prise sur n'importe quel autre échantillon.

La lithologie de la mer est fondée sur l'analyse d'échantillons qu'il s'agit d'abord de recueillir au fond des eaux en des points dont les coordonnées géographiques auront été rigoureusement déterminées. On a imaginé dans ce but un nombre considérable de modèles d'instruments. D'une façon générale, on peut dire que rien n'est plus facile que d'obtenir des échantillons de vase. Forel en a rapporté par près de 300 mètres, dans le lac de Genève, à l'aide d'un seau d'enfant promené sur le fond. Le moins compliqué de tous les systèmes est celui dont s'est servi la *Belgica*. Il consiste en un simple tube métallique de trois centimètres de diamètre chargé au moyen d'un boulet percé ou d'un poids en fonte muni d'une ouverture centrale permettant d'y enfiler le tube et de le faire arriver bien verticalement sur le sol. Beaucoup d'appareils ne sont que des perfectionnements réels ou supposés de ce dispositif. La vase toujours plus ou moins collante, pénètre dans le tube dont l'intérieur est lisse ; elle demeure compacte sans se délaver pendant la remontée, de sorte qu'une fois à bord, il suffit de pousser le boudin vaseux avec un mandrin en bois pour le forcer à sortir d'une seule pièce représentant une coupe du sol sous-marin d'une épaisseur égale à la longueur du tube. Avec le sondeur Buchanan, le prince de Monaco obtenait des boudins longs d'une trentaine de centimètres, au plus ; il lui a suffi d'augmenter la longueur du tube et la puissance du poids pour en avoir qui atteignent jusqu'à 50 centimètres. On marque sur le boudin le haut et le bas d'un

signe continu qui permettra de se reconnaître même dans le cas si fréquent de sa rupture en plusieurs fragments par dessiccation. Je trace avec un couteau un trait suivant une des génératrices et plusieurs têtes de flèches dont la pointe est dirigée vers le bas de l'échantillon dans la direction que suivait le plomb en pénétrant dans le sol. On laisse sécher doucement de manière à augmenter la consistance de la vase, et ensuite on enveloppe avec un papier non collé, puis avec un morceau de calicot préalablement lavé afin de le débarrasser de tout son apprêt et sur lequel on inscrit au crayon le numéro du sondage, la date et la profondeur. Chaque rouleau est introduit dans un gros tube de verre bien bouché sur lequel on colle une étiquette distinctive et où il se conserve indéfiniment.

Les échantillons sableux sont moins faciles à récolter. Il va de soi que la vieille méthode du plomb suiffé est à rejeter de la façon la plus absolue, car elle ne donne qu'un échantillon incomplet et souillé. Tout au plus servira-t-elle dans le cas de roches pour lequelles l'unique caractère de reconnaissance consiste en une mâchure particulière du suif et quelquefois même du plomb. On se servira d'un sondeur à cône creux, dont l'ouverture tournée vers le haut est fermée par une rondelle de cuir pressée elle-même par la chute convenablement ralentie s'il y a lieu, au moyen d'un dispositif spécial, d'un poids glissant le long de la tige. Cet appareil m'a rendu des services, mais il n'est pas infaillible. On se sert encore du plomb à double cuiller se fermant par un ressort en arrivant au contact du fond. Ce système est peut-être le meilleur, mais s'il tombe sur une roche, il risque de se briser et dans la vase, quelque sensible qu'on ait réglé sa détente, il lui arrive souvent de ne pas se fermer parce qu'il est empâté, ou bien encore de ne se fermer qu'au moment même où on le relève et qu'il sort de la vase. Or, dans ce cas, il est évident qu'il ne rapporte rien.

On emploie aussi une petite drague de 30 à 40 centimètres d'ouverture, en fer forgé et du genre de celles des pêcheurs de goémon bretons. Dans le sac de toile grossière qui continue la drague, on ramène toujours une quantité considérable de fond où

l'on choisit en toute sécurité les échantillons d'essai. Mais, avec cet instrument, on est forcé de draguer sur un espace plus ou moins étendu, ce qui est un désavantage, car lorsque le sol est de nature variée, le long du trait, on promène ainsi l'appareil sur deux ou trois natures de fonds qui se mélangent dans le sac. Il faut, autant que possible, prendre un échantillon sur un point et non sur une ligne. Le problème de la découverte d'un bon appareil ramasseur de sable paraît avoir été résolu par un dispositif récemment employé à bord de la *Princesse Alice*. Il consiste en une double écope en cuivre dont chaque mâchoire présente une section trapézoïdale, très lourde par elle-même et alourdie encore par une surcharge en fonte enfilée sur une tige verticale surmontant l'écope. Les deux mâchoires étant maintenues écartées par une tige horizontale intérieure mobile assez semblable à un loquet de porte, l'appareil est envoyé sur le fond. En le heurtant, les mâchoires s'écartent d'avantage, le loquet tombe par son propre poids, les mâchoires se referment et enlèvent un échantillon qu'elles ramènent intact à la surface, puisque n'étant plus maintenues ouvertes par le loquet, elles retombent fermées. Si par hasard une pierre serrée entre les deux les forçait à rester entr'ouvertes, une portion de l'échantillon serait délavée, mais il en resterait toujours une certaine quantité dans les deux cavités dues à la forme trapézoïdale et le coup de sonde ne serait pas perdu. Il serait désirable que des récoltes d'échantillons soient faites d'une façon systématique à bord de bâtiments de faible tonnage ou d'embarcations et par petits et moyens fonds. Grâce au ramasseur de sable de la *Princesse Alice*, il est devenu loisible à des navires de l'État de sonder sans s'arrêter ou même en se bornant à ralentir quelque peu leur marche et en décrivant un cercle de petit rayon. La précision avec laquelle nos officiers de marine sont habitués à opérer, donnerait des échantillons de toute confiance, très nombreux et dont l'examen permettrait de dresser rapidement un document qui fait défaut, la carte lithologique des côtes de France dont je n'ai établi qu'une esquisse précisément parce que les échantillons me faisaient défaut.

Quand on se livre à des chalutages au large, le filet ramène

d'énormes quantités de vase et comme celle-ci est alors très homogène, il est aisé d'y prendre un échantillon convenable. On a l'avantage d'obtenir ainsi des pierres, des nodules calcaires ou manganésiens qu'aucun autre procédé n'aurait réussi à récolter.

Les fonds de roche sont caractérisés négativement, c'est-à-dire par ce fait que les plombs de sonde reviennent avariés, sans rien rapporter et que les dragues ne reviennent pas. Au voisinage des côtes, personne ne les connaît mieux que les pêcheurs par ce motif que les poissons trouvent une nourriture abondante au milieu des herbes qui les recouvrent, s'y rassemblent et en font d'excellents lieux de pêche. Seulement, quand un pêcheur a par hasard découvert une roche, il se garde bien de divulguer son secret de crainte des concurrents et l'on ne réussit à le faire parler qu'en lui promettant une prime convenable. Les ingénieurs emploient souvent avec succès ce procédé hydrographique d'un genre spécial.

On a proposé d'autres méthodes. L'une d'elles consiste à descendre dans la mer une lampe électrique à réflecteur et à observer l'espace qu'elle éclaire à l'aide d'une lunette d'eau convenablement disposée. Il suffira de connaître l'aspect d'un fond pour en suivre les limites avec une entière précision. Toutefois, quelle que soit la transparence de l'eau, le procédé ne s'applique qu'à de faibles profondeurs. Quand on drague pour récolter des animaux marins en se servant d'un câble en fil d'acier, par profondeurs moyennes, si pendant le traînage on appuie l'oreille contre le câble, on perçoit un son qu'il est impossible de décrire pour le faire connaître de celui qui ne l'a jamais entendu, mais très distinct et qui varie nettement avec la nature du terrain. Le chant de la vase est tout différent de celui du sable et la rencontre des pierres traduite par autant de petits chocs, se laisse parfaitement distinguer. Sur un terrain à peu près connu, le procédé rendra des services surtout pour signaler le passage d'une certaine aire lithologique à une aire lithologique d'une autre nature, du sable à la vase, par exemple. C'est du sondage à l'oreille comme la méthode par la lampe électrique est un sondage à la vue.

Quel que soit le moyen adopté, l'échantillon sera recueilli

complet sans avoir subi aucun triage, le plus fréquent étant, surtout avec la drague, le délavage pendant la remontée. On n'oubliera pas que l'analyse du fond est qualitative et quantitative et que les proportions relatives des divers éléments contenus prennent une importance extrême, chaque caractère reconnu amenant ses conséquences. Aussi l'échantillon doit-il être en quelque sorte comme si on l'avait ramassé avec la main au fond de l'eau. L'abondance de matière est secondaire. Mieux vaut, évidemment, en avoir plus que moins; une cinquantaine de grammes suffit à tout; mais l'important est qu'il soit complet. On ne s'aurait trop le recommander aux personnes qui voudraient en récolter. Aussitôt qu'on l'a obtenu, s'il est sableux, il ne présente que peu ou pas de cohésion; on le sèche dans une assiette et, si l'on est à bord d'un bâtiment à vapeur, le séjour dans la machine permettra d'abréger notablement l'opération; on le conserve dans un sac en calicot étiqueté.

Avant de décrire la façon dont on tire parti de ces échantillons dans le laboratoire et de donner en détail la façon de les analyser, il importe d'indiquer à très grands traits la constitution du sol du lit océanique. Ce premier aperçu permettra de mieux comprendre l'analyse lithologique, le but qu'elle se propose, les classifications et la manière d'en représenter à l'œil les résultats d'ensemble sur les cartes lithologiques. Plus tard on reviendra sur le sujet et l'on étudiera séparément un certain nombre de fonds particulièrement caractéristiques.

Le sol océanique, abstraction faite des quelques rares points d'ailleurs tout proches des rivages où la roche vive n'est pas recouverte, se compose de sédiments meubles dont jusqu'à présent on n'est jamais parvenu à mesurer l'épaisseur et dont l'origine est triple. Une portion minérale est d'origine continentale; une autre portion est constituée par des débris organiques, frustules ou carapaces en grande partie tombés de la surface ou des eaux intermédiaires après la mort de l'être auquel ils servaient comme de squelette; enfin une autre portion qui d'ailleurs n'est pas présente dans tous les échantillons du moins en quantité appréciable, est

d'origine chimique et est formée à l'endroit même où on la recueille par des réactions entre les sels contenus dans l'eau de mer et les matières principalement organiques dissoutes dans cette même eau de mer ou déposées sur le fond. On a déjà mentionné ces réations dont l'ensemble est encore loin d'être connu, à propos de la chimie de la mer. Enfin une infime fraction des sédiments marins est d'origine cosmique.

Les débris organiques jonchant le lit de l'océan sont calcaires ou siliceux ; les principaux seront décrits.

Quant aux débris minéraux, ainsi que l'avaient remarqué même les auteurs anciens, leur proportion dans la totalité d'un échantillon et leurs dimensions, diminuent rapidement à mesure que l'on s'éloigne de la terre. Il est rare qu'ils soient tout à fait absents mais au large leurs grains deviennent extrêmement petits. Ceux auxquels j'ai le plus communément affaire, dans les profondeurs abyssales, sont de dimensions telles qu'il en faut environ 20 000 pour peser 1 milligramme. Néanmoins, au microscope, on parvient à reconnaître assez aisément leur nature minéralogique et leurs caractères essentiels. On trouve en outre, dans tous les fonds, une quantité considérable de matière minérale absolument amorphe et constituée par de l'argile plus ou moins calcaire que ne parviennent pas à résoudre les plus puissants grossissements.

Les sédiments minéraux sont amenés principalement par les fleuves qui roulent leurs débris sableux et argileux jusque dans la mer. Les fragments ainsi apportés ne dépassent guère la grosseur d'un fort grain de sable. Les gros blocs, les galets, les pierres proviennent soit du lit marin lui-même usé par les courants violents qui les ont déchaussés et laissés en relief — ce qui est relativement rare, — ou sont charriés par les glaces comme aux bancs de Terre-Neuve et ce phénomène est restreint aux régions polaires et sub-polaires. La majeure partie résulte de la destruction des rivages par la mer. Il faut toutefois se garder d'exagérer l'importance de ces blocs, pierres et galets cantonnés dans la région côtière et la puissance même de l'érosion dont on voit diminuer le rôle à mesure qu'on sait mieux observer et qu'on acquiert plus

d'expérience. Les vagues ont beau mugir et faire trembler la terre, ce n'est pas ce qui fait le plus de bruit qui fait le plus de besogne et dans le monde matériel comme dans le monde intellectuel, l'infinie puissance est aux infiniment petits et aux silencieux.

La carrière — on pourrait presque dire la vie — des blocs ou pierres est simple. Tombés au pied de la falaise dont ils faisaient partie presque toujours par l'effet des agents atmosphériques dont le plus énergique est probablement l'alternative des gels et des dégels, ces blocs sont lentement usés par l'eau en mouvement et, quand ils sont devenus suffisamment légers, les vagues les transforment en galets en les roulant les uns sur les autres sur les plages. Chaque bloc ne se brise guère; s'il est gros, il ne se divise pas en fragments moins gros qui à leur tour se briseront de plus en plus. Il se désagrège et s'use à la surface, diminuant lentement de volume et donnant naissance à une véritable poussière minérale que la mer entraîne immédiatement au loin et qui va se déposer non dans les parties les plus profondes des océans, mais dans les plus centrales, généralement les plus tranquilles qui sont, il est vrai, le plus souvent quoique pas toujours, les plus profondes. En exagérant ma pensée pour la faire mieux saisir, je dirais presque qu'un bloc, si énorme qu'il soit et jusqu'à ce qu'il ait atteint la dimension de galet ou de gros gravier, se transforme tout entier en boue impalpable jusqu'à ce qu'il soit devenu un grain de sable unique.

Sur le globe, tout élément rocheux fût-il détaché du plus haut sommet de la plus haute montagne de la terre, commence à tomber dès qu'il a quitté la roche mère. A partir de cet instant, aussi longtemps qu'il existera dans son individualité, il descendra, descendra toujours, inlassablement, jusqu'à ce qu'il soit parvenu à l'océan. Parfois il s'arrêtera, jamais il ne remontera d'où il vient. Fouetté par la pluie, entraîné par le ruisseau, le torrent, la rivière, le fleuve, il sera forcé d'obéir. Et quand il aura atteint la mer, roulé par les vagues, charrié par les courants, il continuera au sein des flots sa marche vers le plus bas, vers l'abîme ; là seulement il trouvera, sinon le repos, du moins l'immobilité.

Les vagues ne font sentir leur influence qu'à la surface ; leur

puissance décroît rapidement à mesure que la profondeur augmente. Les frères Weber, au moyen d'expériences aussi simples qu'ingénieuses, ont constaté que leur agitation, dans la direction verticale, ne s'éteignait complètement qu'à une profondeur égale à 360 fois environ leur hauteur. Des vagues hautes de 10 mètres agiteraient donc les molécules liquides profondes jusqu'à 3 600 mètres. Pratiquement, le mouvement cesse bien avant cette limite. Aimé a fait en Méditerranée des expériences véritablement pratiques qui, pour la région particulière où il opérait, la rade d'Alger, fixaient la limite à 40 ou 45 mètres. Ces mesures mériteraient d'être reprises. Il y a tout lieu de croire que l'agitation réelle, capable d'amener des résultats sérieux de transport de graviers et de sables ou de creusement du sol, est extrêmement faible au-dessous d'une vingtaine de mètres. L'intervalle entre la surface et 20 mètres ou zone littorale, mériterait donc d'être appelé zone d'action des vagues. S'étendant en bande autour des continents, suivant les dentelures des côtes, sa surface constitue comme un vaste atelier de trituration et d'usure, bordé par la côte elle-même et où arrive directement la masse des pierres et autres sédiments fluviaux. Sur toute cette zone à laquelle il faut ajouter la bande des plages, entre la ligne d'extrême basse mer jusqu'à la limite la plus lointaine qu'atteignent les vagues par les plus violentes tempêtes, les pierres, dès qu'elles sont assez peu lourdes pour être déplacées et, en chaque point, la dimension en varie évidemment avec la force des vagues, sont continuellement roulées les unes contre les autres, leurs chocs mutuels en détachent de petites esquilles qui s'arrondiront et deviendront ensuite des grains de sable, et comme l'eau conserve toujours vives les surfaces de fracture, les chocs conservent leur activité, les pierres s'arrondissent et prennent cette forme ellipsoïdale aplatie qui en fait des galets. Il suffit sur n'importe quelle plage, d'écouter le fracas du ressac roulant les galets pour comprendre avec quelle énergie s'accomplit cette pulvérisation dont le résultat final est la diminution, puis la disparition du galet, sa transformation en grain de sable et enfin en poussière minérale impalpable. Celle-ci infinimemt menue, se maintient en suspension

dans les eaux superficielles pendant un temps très long, grâce à l'agitation, est emportée par les courants et, profitant de toutes les occasions de descendre, rencontre de régions de calmes ou remous de courants, elle finit par atteindre la limite inférieure de la zone de mouvement océanique, entre dans des eaux de plus en plus tranquilles au sein desquelles elle descend plus vite, puis dans des eaux absolument immobiles où elle hâte encore sa vitesse de chute et arrive enfin sur le fond. Il est évident que l'abondance des poussières descendant de la surface n'est aucunement en relation avec la profondeur de l'eau, mais avec son agitation superficielle qui, d'une façon générale, est moindre au centre des océans que sur leurs bords. Il est vrai que les parties les plus profondes sont plutôt vers le centre, cependant il n'y a là qu'une coïncidence et non une relation de dépendance.

La chute des poussières joue un rôle multiple dans l'économie de l'océan. Chaque grain est enveloppé d'une gaine d'air qu'il a prise au contact de l'atmosphère et qu'il apporte avec lui dans les profondeurs. Cette gaine se dissolvant dans l'eau ambiante et d'autant mieux que celle-ci manque d'avantage d'air pour un motif quelconque, l'aère et permet ainsi aux êtres habitant le fond, au benthos, de respirer et par conséquent de vivre. Les poussières provoquent en outre le brassage mécanique des diverses couches liquides superposées et assurent la similitude de composition de l'eau océanique sous tous les climats, qui oblige, pour distinguer les légères différences existant, si importantes dans leurs conséquences, à des analyses extrêmement précises et délicates, prises de densités, dosages d'éléments constituants tels que les halogènes ou l'acide sulfurique.

Parvenus au fond, les grains minéraux extrêmement petits qui seuls ont pu, grâce à leurs très faibles dimensions, accomplir le voyage de la côte à la haute mer et ensuite de la surface au fond, sont soustraits à toute usure mécanique. Sur le sol des abîmes ils ont trouvé l'immobilité — ou à peu près — et pourtant ils ne possèdent pas encore le repos absolu. Ils s'usent, avec une effroyable lenteur, il est vrai, par dissolution dans le liquide qui les

baigne et par diagenèse, c'est-à-dire par réactions mutuelles entre les éléments salins de l'eau et les éléments chimiques du minéral. Toutes ces questions, toutes ces mesures auraient besoin d'être étudiées, prises et précisées au moyen d'expériences directes. La chimie des profondeurs où la pression mécanique peut dépasser 950 atmosphères doit différer de celle à laquelle nous sommes habitués dans nos laboratoires où les phénomènes s'accomplissent à la simple pression atmosphérique. Le total de ces destructions est représenté par de l'argile, silicate d'alumine impur de composition variable qui est vraiment ce que les anciens alchimistes auraient nommé le *caput mortuum* du règne minéral. Tout minéral finit par devenir de l'argile et c'est seulement à cet état qu'il semble avoir atteint le complet repos physique et chimique. Quel beau travail entreprendrait un minéralogiste d'élucider l'histoire complète de l'argile ! L'œuvre, sans présenter en apparence de trop grosses difficultés, ne demanderait sans doute que du temps et, malheureusement aussi, un minéralogiste un peu chimiste, un peu géologue et un peu océanographe. Mais que de jolies découvertes il y aurait tout le long de ce travail !

Comme la pluie de poussières descendant de la surface se continue sans interruption, il se produit sous le poids, sans cesse augmentant des couches nouvelles, un tassement des couches inférieures. J'ai fait quelques expériences à ce sujet. Il paraît en résulter qu'une fois réduite à occuper une hauteur trois fois moindre que celle qu'elle occuperait à sec, à son maximum de densité, une argile cesse, dans l'eau, de se comprimer. Il en résulte que les couches d'argile continentales maintenant exondées, jadis déposées au fond des eaux, occupent aujourd'hui un volume trois fois moindre qu'autrefois. Si, quand elles sont sorties de l'eau, elles étaient recouvertes d'autres couches, sables indurés, calcaires ou autres, celles-ci compactes tant qu'elles étaient mouillées et qu'elles s'appuyaient sur un soubassement d'argile solide, ont dû, par suite de la dessiccation et du retrait de cette dernière, éprouver des cassures, des plissements, des contournements, des affaissements, en un mot des dislocations diverses qu'on aurait tort d'attribuer

à des phénomènes cataclysmiques, tremblements de terre ou commotions volcaniques. L'existence des hommes et des roches manque le plus souvent de grandes catastrophes, heureuses ou malheureuses; elle est semée d'une série de beaucoup de petites catastrophes dont la somme algébrique s'appelle, pour les hommes, le bonheur ou le malheur et, pour les roches, la situation dans laquelle elles nous apparaissent aujourd'hui et où elles sont parvenues successivement et lentement bien plutôt que brusquement et brutalement. Les lois naturelles demeurent les mêmes; pierres, plantes, animaux et hommes sont forcés de leur obéir. Les lois des pierres sont la vraie minéralogie et la vraie géologie; les lois fatales des hommes s'appellent l'esprit de l'histoire. Les événements qui s'enchaînent suivent un cours immuable; ils sont conséquences les uns des autres. Un peu plus tôt, un peu plus tard, chaque minéral, payant sa vie, disparaîtra pour revivre; chaque nation payant son passé, mourra pour revivre, mais sous une autre forme.

La chute des poussières au sein des eaux marines donne lieu à d'autres phénomènes intéressants. Dans un vase rempli d'eau pure, jetez une poussière impalpable; elle descendra très lentement en manifestant diverses particularités, entre autres l'apparition de nappes sur lesquelles il est inutile d'insister ici et finalement, elle tombera sur le fond. Remplacez l'eau pure par une solution saline quelconque et, bien entendu, telle qu'il ne se produise aucune réaction chimique entre le liquide et la poudre, elle va tomber presque immédiatement. De l'argile dans de l'eau distillée absolument pure, mettra des mois, pour ne pas dire des années, à parvenir sur le fond du vase et encore l'eau ne redeviendra-t-elle jamais parfaitement limpide. Ajoutez quelques grains de sel de cuisine, agitez; les poussières tomberont immédiatement et en quelques minutes, le liquide sera redevenu limpide. La vitesse de chute d'un grain solide au sein d'un liquide, abstraction faite de sa forme qui ne joue ici qu'un rôle secondaire, dépend de la différence de densité existant entre lui et le liquide. Si le grain devient infiniment petit, d'autres forces — des forces moléculaires — se superposent à celles qui existaient tout à l'heure. Peut-être le dépôt

si lent de l'argile dans l'eau distillée est-il dû à une gaine d'air enveloppant chaque grain. Pour s'en assurer, il suffirait de constater la clarification après qu'on aurait fait bouillir, pour en chasser l'air, ou les poussières ou le liquide, afin de permettre à celui-ci de dissoudre l'air supposé entourer les particules d'argile non bouillies. L'expérience mériterait d'être tentée. Quant à l'argile descendant si promptement dans le liquide salé, tout se passe comme si chaque particule s'entourait d'une portion du sel dissous, condensée à sa surface, de manière à perdre sa gaine d'air retardatrice et à acquérir une gaine de sel condensée jouant, par conséquent, un rôle accélérateur de chute, par suite du changement provoqué dans le rapport entre les densités du solide et du liquide ambiant. L'un augmenterait de densité par fixation de sel, l'autre en diminuerait au contraire par affaiblissement de la teneur en sel, d'où augmentation de différence et accélération de la vitesse de chute. Les lois de ces attractions ne sont pas encore bien élucidées. Quelles variables règlent l'attraction des divers corps entre eux? Serait-elle une fonction de la masse, de l'équivalent chimique, du degré de dilution du solide dissous dans le liquide dissolvant? Qui sait si en poursuivant cette étude on ne tomberait pas sur la loi de la gravitation universelle, la loi des masses et des distances, gouvernant le monde des plus qu'infiniment petits, les molécules et les atomes, comme elle gouverne l'infiniment grand des mondes planétaires? Quoi qu'il en soit, c'est ainsi que s'expliquent la purification des eaux par filtration au travers du sol, le trouble persistant de certaines rivières dont l'eau est particulièrement pure et, pour en revenir à l'océanographie, le dépôt des sédiments apportés par les fleuves immédiatement devant l'embouchure où, si la mer est suffisamment calme, ils donnent naissance dès leur premier contact avec l'eau salée à une barre ou à un delta.

Bien d'autres expériences mériteraient d'être faites; elles n'exigeraient point de génie de la part de celui qui les exécuterait, mais seulement du soin, de la patience, de la méthode et — hélas! du temps. Les applications à la géologie seraient du plus haut intérêt. Guidé par les chiffres trouvés, on reconstituerait l'histoire vivante

des couches maintenant rocheuses et sèches, jadis fonds de mer disparus depuis des siècles de siècles. Une espèce minérale étant donnée, il faudrait mesurer sa résistance aux actions diverses exercées par l'eau. La résistance aux actions mécaniques fournirait la vitesse des courants de l'océan d'autrefois et l'on y parvient en observant si les grains de sable sont anguleux ou arrondis — résistance à l'action dissolvante et l'on aurait peut-être le temps que le minéral est resté immergé — résistance à l'action chimique de diagenèse et l'on s'expliquerait, parmi un ensemble de minéraux déposés en même temps, la disparition de quelques-uns, la transformation de certains autres. De déduction en déduction et non de rêverie en rêverie, sans cesser de s'appuyer sur des chiffres, des mesures, des expériences rigoureuses de synthèse et d'analyse, un grain de sable examiné au microscope raconterait l'histoire entière de l'océan silurien, dévonien, jurassique ou crétacé au sein duquel il a flotté, au fond duquel il a roulé. On aurait son étendue, sa profondeur, la puissance de ses vagues, leur direction la plus ordinaire et par conséquent la force et la direction de ses vents, la salure, la densité, la température de ses eaux; on mesurerait ses courants, on calculerait la forme de son lit, ses pentes plus ou moins abruptes; on assisterait à ses tempêtes, on contemplerait ses calmes, on entendrait en quelque sorte le mugissement de ses flots battant, sous un ciel limpide ou brumeux, les plages de continents ou d'îles dont la paléobotanique ferait connaître les arbres, les plantes, les fleurs et les fruits; dont la paléozoologie montrerait les animaux depuis les plus énormes jusqu'aux plus humbles insectes, jusqu'aux microbes eux-mêmes, aussi actifs autrefois, comme on commence à peine à soupçonner, qu'ils le sont aujourd'hui. La science est d'autant plus remplie d'art et de poésie qu'elle est plus rigoureuse et seul, le chiffre, unique garantie de vérité, lui donne son entière splendeur.

Nous avons suivi dans leur marche du rivage aux portions centrales des océans, les sédiments minéraux fins. Les galets et les sables qui leur ont donné naissance n'ont, pendant ce temps, pas quitté les eaux peu profondes des côtes. Poussés vers la terre par

la marée et la vague, repris par le flot descendant, successivement couverts d'herbes marines et, ainsi allégés, lancés comme autant de projectiles contre les falaises, dépouillés alors de leur parure d'algues et immobilisés, puis de nouveau pris et repris, roulés, broyés les uns par les autres, ils sont lentement entraînés le long du rivage, accomplissant en ligne brisée des kilomètres pour avancer de mètres mesurés en ligne droite, ils s'usent surtout mécaniquement jusqu'à ce que, complètement réduite en parcelles, l'énorme pierre devenue galet, devenue grain de sable, devenue grain de poussière, ait été en quelque sorte rendue digne de partir enfin pour le vaste océan lointain aux grosses vagues de houle, aux régions de calme où la mer poudroie d'étincelles sous le soleil, puis de là, à travers les profondeurs glauques, sur le sol des abîmes sombres et silencieux où dorment, couchées dans la vase, les carcasses des navires naufragés, masses informes et immobiles, éclairées par instants des lueurs phosphorescentes verdâtres, violettes ou rouges des poissons des grands fonds.

La récolte et l'étude des fonds marins ont pour but la solution d'un grand nombre de problèmes et, parmi eux, celui qui, peut-être, les résume tous ou du moins est le meilleur outil servant à les élucider tous, l'établissement d'une carte lithologique du sol immergé. Dès le début, il est indispensable, pour se reconnaître dans l'extrême diversité des échantillons, de fixer une classification. Plusieurs ont été proposées dont aucune, il faut l'avouer, n'offre le caractère de précision et de simplicité qui la rendrait vraiment scientifique. Ayant eu à m'occuper des fonds récoltés par le prince de Monaco dans ses diverses campagnes, j'ai dû étudier la question avec beaucoup de soin et peser sérieusement les avantages et les désavantages des diverses classifications. Comme en définitive, je n'ai été satisfait d'aucune, j'ai été amené à en créer une nouvelle et je vais exposer ici les motifs qui m'ont guidé.

On est frappé du manque de précision des dénominations employées pour désigner les fonds. Si tout le monde semble à peu près d'accord sur ce qu'on entend par les mots pierres, cailloux, galets, graviers et sables, il n'en est pas moins vrai que personne

n'a eu l'idée d'établir de limites rigoureuses pour ces diverses catégories de terrains et, à la limite, certains échantillons nommés graviers par un observateur, seront appelés sables par un autre. La même incertitude, plutôt encore augmentée, existe s'il s'agit de qualifier un sable gros, moyen, fin ou très fin et elle atteindra son maximum pour les vases, les vases sableuses, les sables vaseux, les argiles et les boues, termes créés pour des usages pratiques immédiats, alors que rien n'était soupçonné des immenses progrès que devait accomplir l'océanographie. Je laisse de côté les désignations employées dans divers pays et purement locales. On s'est contenté d'affirmer que tout le monde, ce qui, en réalité, signifiait personne, savait faire les différences. Il est curieux que les désignations soient aussi imprécises en anglais et en allemand avec les mots *ooze*, *mud*, *clay*, ou *schlamm* et *schlick*. Le premier soin doit donc être de fixer nettement la signification et les limites de ces termes. A vrai dire, la limite même importe assez peu, l'essentiel est qu'elle existe, soit bien établie et adoptée par tous afin que le même échantillon porte toujours et partout le même nom. Le caractère d'un fond, parmi tous les autres, ne donnant prise à aucune discussion puisqu'il est en quelque sorte mathématique, est la dimension des grains qui le composent, tous minéraux quelle que soit d'ailleurs leur origine, et la proportion relative des grains de telle ou telle dimension. Il convient donc de séparer un échantillon en catégories dont chacune ne contienne que des grains de même grosseur et qu'il suffira ensuite de peser et de ramener à un total de 100 pour avoir la relation cherchée.

Le commerce et certaines industries, en particulier la minoterie, font usage de tamis calibrés susceptibles d'effectuer ce triage dans des conditions satisfaisantes. Ils sont en fils de fer ou de laiton ou bien en tissu de soie dite soie à bluter. On les distingue par leur numéro indiquant le nombre de mailles comprises sur une longueur déterminée qui, dans l'espèce, est l'ancien pouce égal à 27 millimètres. C'est ainsi qu'un tamis n° 3, par exemple, aura 3 mailles et un tamis 200, le plus fin de tous, 200 mailles sur 27 millimètres de long. Bien entendu, cela n'implique pas que

chaque maille carrée du tamis 3 ait pour dimension le tiers de 27 millimètres, c'est-à-dire 9 millimètres, car l'épaisseur des fils est à défalquer. On en est quitte pour mesurer une fois pour toutes la dimension du vide des mailles pour chaque numéro de tamis, bien qu'en fait, cette connaissance n'ait pas grand intérêt, mais on est assuré de trouver partout, en demandant des tissus de soie à bluter d'un numéro déterminé, des tamis identiques. Il ne faut pas oublier que la dimension des mailles des tamis de soie est modifiée quand on les mouille. Ainsi que le prouve un examen au microscope, elles se rétrécissent et assez irrégulièrement, aussi sera-t-il nécessaire de n'opérer qu'à sec, ou, si l'on est forcé d'agir sous l'eau, comme c'est le cas pour les fonds marins, de faire passer de nouveau, avant de les peser, les fractions isolées par des tamis secs.

Dès lors les fonds seront classés de la manière suivante qui, je le répète, est arbitraire, mais telle qu'un même échantillon sera toujours désigné de la même manière par tous ceux qui auront à le décrire.

On dit qu'un fond est de roche lorsque le plomb de sonde ne rapporte rien et l'on appellera pierres ou galets les fragments anguleux ou arrondis d'un poids supérieur à 3 grammes.

Les graviers seront gros, moyens ou fins selon qu'ils seront arrêtés par les tamis 3, 6 et 10.

Les sables seront gros, moyens, fins et très fins s'ils sont respectivement arrêtés par les tamis 30, 60, 100 et 200 après avoir franchi le tamis du numéro immédiatement supérieur.

Tout ce qui a franchi le tamis 200 porte le nom de vase et comprend des grains minéraux fins-fins ayant chacun son individualité minéralogique, au microscope, et qu'il n'est pas impossible d'isoler avec une certaine précision ainsi qu'une portion amorphe en partie calcaire et en partie inattaquable à l'acide chlorhydrique étendu. Cette dernière est l'argile.

Cette classification supprime toutes les autres. Des désignations telles que fonds terrigènes ou abyssaux ne spécifient rien qu'une origine d'ailleurs sujette à être discutée; des fonds dits de mer profonde ou improfonde, du large ou côtiers n'ont point de valeur

distinctive, car peu importe l'endroit où l'on a récolté l'échantillon à qui ne se propose que de le nommer. Je m'élève davantage encore contre les appellations impliquant la présence de tels ou tels animaux ou végétaux comme vases à diatomées, à globigérines ou à radiolaires, pour une foule de raisons dont la première est qu'il n'existe aucun procédé pour trier et isoler la totalité garantie des débris organiques de telle ou telle espèce dans un échantillon et, la seconde, qu'il y a bien peu de fonds où, en les cherchant bien, on ne découvre en même temps deux, trois variétés de ces débris d'organismes. On répondra par la rareté ou l'abondance relatives de celles-ci. Les adjectifs « abondant » ou « rare » n'offrent pas la moindre rigueur scientifique puisque personne n'est capable d'affirmer où finit la rareté et où commence l'abondance. Enfin je ne saurais admettre les désignations topographiques telles que vases du Nord ou vases du Sud de quelques auteurs, pour ce motif que la vase du Nord par rapport à une localité est vase du Sud par rapport à une autre et qu'il importe de faire, non de l'océanographie locale, mais une océanographie s'appliquant à l'océan tout entier. De quelque part qu'il vienne, l'échantillon doit être nommé à l'aide de procédés simples et précis et de manière à ce que chacun lui donne le même nom. J'ai désigné plusieurs centaines d'échantillons d'après ma méthode; jamais je ne l'ai trouvée en défaut et c'est pourquoi on me permettra de la trouver bonne et de m'y tenir.

Étant ainsi fixé sur la valeur des termes gravier, sable et vase, on conviendra qu'un échantillon continuera à être considéré comme un sable tant qu'il ne contiendra pas plus de 5 pour 100 de vase. Si la proportion de celle-ci augmente, pourvu qu'elle n'atteigne pas 25 pour 100, on a un sable vaseux; entre 25 et 90 pour 100 de vase une vase sableuse, enfin la vase proprement dite contiendra moins de 10 pour 100 de grains ou plus de 90 pour 100 de vase.

La proportion de calcaire jouant un rôle important, il est utile de donner une qualification à limites précises, à ce point de vue spécial, aux divers fonds. C'est ainsi qu'un échantillon quel qu'il soit, vase ou sable, sera faiblement calcaire, très calcaire ou extrê-

mement calcaire s'il renferme, au plus, 5 pour 100, ou de 5 à 50, de 50 à 75 et enfin plus de 75 pour 100 de carbonate de chaux.

L'échantillon nommé, on procède à son analyse.

L'analyse est multiple : mécanique, chimique, biologique; tel élément sans intérêt pour un certain ordre de recherches est susceptible en effet de prendre une importance dans d'autres recherches prévues ou imprévues. Chaque fois que l'on possède un échantillon de fond marin de position connue, on peut être amené à y chercher par les procédés précis des sciences expérimentales, la vérification ou la négation de toutes les hypothèses dont il aura suggéré l'idée. C'est pour cela qu'il est si désirable que le même échantillon soit étudié à tous les points de vue, car on est ainsi amené à discerner des relations qui autrement n'auraient jamais été soupçonnées entre les divers caractères, et c'est là aussi que se trouve l'avantage de posséder des échantillons abondants.

La classification est basée sur une analyse mécanique à laquelle s'ajoute un peu d'analyse chimique. Après avoir passé l'échantillon aux tamis divers, on le traite par l'acide chlorhydrique étendu afin d'y doser le carbonate de chaux. On soumet ensuite le résidu à un nouveau passage aux tamis pour déterminer par différence la part de calcaire qui revient à la vase et celle attribuable au sable. Enfin, un triage à la liqueur d'iodures des grains qui ont résisté à l'acide, laisse évaluer la proportion de minéraux lourds, c'est-à-dire de densité supérieure à 2,7, immédiatement supérieure à celle du quartz, et celle des minéraux légers comprenant le quartz et ceux qui sont encore moins denses que lui.

Ces minéraux et d'ailleurs le fond tout entier, sont examinés au microscope. Les débris calcaires animaux ou végétaux, quant à leur nature organique, relèvent de l'analyse biologique dont il sera parlé plus tard. Cette étude microscopique est assez délicate à cause de la dimension très faible des grains dans la plupart des cas. On en aura une idée en se rappelant que la dimension moyenne de ceux auxquels j'ai affaire dans mes analyses de vases de grands fonds est telle qu'il faut environ 20 000 de ces grains pour peser un milligramme; elle implique une technique spéciale quelque peu

différente de celle en usage pour l'examen microscopique des lames rocheuses minces. Elle est fondée sur l'aspect général du grain, les phénomènes qu'il manifeste en lumière naturelle et en lumière polarisée, avant et après calcination, sa résistance plus ou moins énergique à l'action d'acides comme l'acide hydrofluosilicique ou les vapeurs d'acide fluorhydrique et les résultats cristallins de l'attaque, la façon de se comporter pendant la calcination et d'autres caractères encore. Le microscope permettant de reconnaître la nature individuelle des grains, donne les moyens de savoir leur provenance de telle ou telle région continentale dont la constitution rocheuse est déjà connue. La nature minéralogique donne la densité et plusieurs autres propriétés ; on voit si le grain a été rejeté par un volcan, s'il est anguleux et alors il aura été entraîné flottant dans le courant, ou arrondi parce qu'il aura été roulé sur le fond et, dans l'un comme dans l'autre cas, on obtiendra une notion sur la direction et la vitesse des courants qui l'ont charrié. L'analyse microscopique en y comprenant l'analyse micro-chimique est tout à fait indispensable en lithologie sous-marine.

L'analyse chimique qualitative ou quantitative à laquelle peut être soumis un fond est variable à l'infini selon le but que l'on se propose de mettre en lumière. Les procédés sont ceux de l'analyse chimique ordinaire parfois modifiée ainsi que l'exige le faible pourcentage des corps dont on cherche le plus souvent à déceler la présence. C'est ainsi que Dieulafait s'est servi de l'analyse spectrale pour discerner des traces infiniment petites de matière, zinc ou manganèse. Les substances organiques jouent un rôle si important que dans la plupart de mes échantillons, je les ai dosées sous forme d'ammoniaque. Il est probable que l'évaluation des diverses silices et celle du phosphore présenteraient un notable intérêt. Néanmoins comme une analyse immédiate exige beaucoup de temps, il ne faut l'entreprendre que si l'on voit clairement le but où elle doit conduire et plus que jamais il est indispensable de rappeler le sage conseil de Mohr : adresser à la nature la question bien définie à laquelle l'analyse devra répondre affirmativement ou négativement.

Une analyse mécanique exigeant des pesées est impossible à

exécuter à bord. On se contente alors d'une analyse approximative mais rapide, qui consiste à introduire un ou deux grammes de l'échantillon dans un tube en verre fermé à l'une de ses extrémités et contenant de l'eau de mer. On agite vivement et on laisse déposer en maintenant le tube bien vertical. On mesure exactement la hauteur du dépôt après une minute et après trente minutes. Le rapport entre ces deux hauteurs fournit sensiblement le rapport entre le sable et la vase et par conséquent permet de nommer le fond.

Supposons que sur un certain espace de mer, on ait recueilli en un grand nombre de points des échantillons dont chacun aura été l'objet d'une analyse. Si on a eu soin de noter sur la carte de cette région le lieu de chacun des sondages par un petit rond, il suffira d'attribuer à chaque espèce de fond une couleur spéciale, par exemple le bleu pour les roches, le rose pour le sable, le brun plus ou moins rouge pour le sable vaseux et la vase sableuse, le jaune clair pour la vase et de peindre de cette couleur le petit rond, pour avoir dressé un canevas de la carte lithologique. Les points étant suffisamment rapprochés, on entourera d'un trait tous ceux juxtaposés ayant la même couleur et on lavera de cette couleur l'aire tout entière. On figurera ensuite par des signes coloriés diverses particularités du fond : les pierres au moyen de triangles, les galets par des circonférences, les graviers par des points rouges, puisque les pierres, les galets et les graviers sont en quelque sorte de la famille du sable, les coquilles en bleu clair, par des croix si elles sont entières, par des traits enchevêtrés si elles sont brisées, par des points si elles sont moulues, les herbiers par des traits horizontaux verts et l'on aura ainsi une carte qui, d'un seul coup d'œil, montrera la nature du fond. J'ai employé ce procédé pour l'atlas lithologique en 22 feuilles grand aigle que j'ai dressé des côtes de France d'après les cartes de la marine. Certes mon travail n'est pas définitif : il n'est pas sûr qu'il le soit dans un demi-siècle et encore à la condition qu'on y travaille. Dans son état actuel, je le considère comme une simple esquisse fournissant un premier aperçu et surtout permettant d'être incessamment améliorée. Grâce à l'avantage d'une classification précise qui établit l'unité

de dénomination, à l'accord sur la gamme des colorations, toute observation suivie d'une analyse et d'un pointage, fût-elle unique et en quelque lieu que ce soit, sera une amélioration. En outre deux océanographes travaillant l'un dans la Manche ou l'Atlantique et l'autre dans la Méditerranée, seront assurés de rester d'accord. Les cartes lithologiques, pour les régions inondées, sont l'exacte image des cartes géologiques pour les régions exondées. Si l'on veut se souvenir que la carte géologique de la France commencée il y a bientôt un siècle et demi, n'est pas encore terminée et de plus, qu'une carte marine lithologique où chaque coup de sonde ne garantit que le point même où il a touché le sol, est beaucoup plus laborieuse et plus longue à dresser qu'une carte géologique terrestre, on comprendra le délai que nous fixions à l'achèvement de l'œuvre. Je souhaite qu'on s'en occupe le plus tôt et le plus activement possible, car un pareil document rendra d'immenses services pratiques à tous ceux qui travaillent la mer, pêcheurs, ingénieurs, télégraphistes et marins. Plusieurs nations en ont dressé de semblables et en particulier la Norvège dont l'industrie essentielle est la pêche. Et c'est parce que l'œuvre est éminemment utile et très longue à achever qu'on ne saurait trop faire appel au concours et au dévouement de tous.

CHAPITRE V

LE SOL OCÉANIQUE

La classification des fonds océaniques la plus connue est celle que Murray et Renard ont adoptée dans leur beau volume *Deep sea Deposits*, des Mémoires du *Challenger*. Ils les partagent en sept catégories : dépôts terrigènes, boues et sables coralliens, vases à globigérines, vases à diatomées, vases à radiolaires, vases à ptéropodes et argiles rouges. Cette classification présente ce grave défaut que les catégories n'y sont point limitées ou du moins le sont d'une manière trop vague et approximative. Il en résulte qu'avec elle, le même échantillon examiné par des observateurs différents risquera certainement de recevoir deux ou même trois appellations différentes. Le mot terrigène caractérise très bien la genèse d'un fond et très mal l'échantillon considéré lithologiquement au point de vue de sa constitution. Si une vase, d'après une convention établie par le Dr Murray lui-même, doit être désignée sous le nom de vase à globigérines à partir d'une teneur minimum de 30 pour 100 de ces foraminifères, quels procédés de triage faudra-t-il employer pour isoler ceux-ci avant de les peser et de se servir de leur poids pour caractériser l'échantillon ? Les diatomées, les radiolaires, abondants ou rares, se rencontrent à peu près partout ; conviendra-t-il de laisser à l'arbitraire l'évaluation d'un plus ou d'un moins ? Pour quelques échantillons typiques, l'hésitation sera moindre ; elle sera complète pour les échantillons de composition intermédiaire, de beaucoup les plus fréquents.

Tels sont les motifs qui empêchent d'adopter la classification de MM. Murray et Renard. En se basant sur l'analyse, il n'existe que

quatre sortes de fonds : les sables, les sables vaseux, les vases sableuses et les vases, appellations d'ailleurs vulgaires et familières à tous les marins. Si l'on éprouvait le besoin d'établir une différenciation plus serrée entre les diverses vases qui en effet occupent à elles seules la presque totalité du lit océanique, rien n'empêche de s'appuyer sur leur richesse en calcaire et de les subdiviser en faiblement calcaires, calcaires, très calcaires et extrêmement calcaires. Comme ces catégories ont chacune leurs limites numériques parfaitement arrêtées puisque la teneur en carbonate de chaux, loin de dépendre d'une estimation personnelle, se mesure par un dosage chimique rigoureux, il devient absolument impossible au même échantillon, quel que soit le nombre des observateurs, de ne pas recevoir toujours le même nom.

Les catégories du Dr Murray seraient plus acceptables s'il s'agissait d'une étude générale des sédiments marins. La dénomination de fonds terrigènes, malgré son vague et justement même à cause de son imprécision, représente bien l'ensemble de ces terrains, plutôt sableux que vaseux, voisins de la terre qui en a fourni les éléments. Il en est de même de la désignation d'argile rouge ou bleue et, à la très grande rigueur, de celle de vase à globigérines, avec toutefois cette restriction qu'aucun sens nettement précis n'y sera attaché et qu'elle ne sera employée que pour faciliter le langage.

S'il faut non plus désigner un fond ou construire une carte lithologique, œuvres de rigueur et d'exactitude, mais présenter un aperçu de la constitution du sol océanique pris dans son ensemble, le plus simple est d'en appeler à la genèse des fonds dont l'origine est quadruple. Une portion provient en effet de la désagrégation des roches continentales dont les fragments sont apportés par les fleuves de l'intérieur jusqu'à la mer, ou sont arrachés aux rivages mêmes. Ce sont les fonds terrigènes. Une autre portion d'origine organique est constituée par les restes calcaires ou siliceux, c'est-à-dire devenus minéraux, d'êtres ayant vécu dans les eaux et principalement à leur surface. Une troisième portion, d'origine chimique, résulte des réactions s'accomplissant entre la matière organique et les sels dissous dans l'eau de mer et les matériaux déjà déposés

sur le sol immergé. Enfin une dernière portion est d'origine cosmique et aérienne. Il importe de fournir quelques détails sur chacune de ces diverses sortes de fonds.

Les fonds terrigènes sont éminemment détritiques. Comme il est aisé de le comprendre, ils sont les plus rapprochés de la côte d'où ils tirent leur origine. La mer, étant donnée la faible profondeur à laquelle se fait sentir l'influence mécanique des courants et des vagues, est moins un atelier d'usure et de trituration, sauf sur son extrême bord, qu'un atelier de classement. En revanche, cette opération s'y effectue avec une incroyable délicatesse. Ces dépôts, à grains d'autant plus fins qu'ils sont plus éloignés des continents, sont disposés par bandes parallèles de plus en plus larges et par conséquent recouvrant une surface de plus en plus considérable, à mesure qu'on s'avance des rivages vers l'intérieur des océans.

Cette régularité théorique n'est cependant pas toujours réalisée dans la pratique.

La véritable zone d'usure par roulement des grains de sable ne dépasse pas la profondeur à laquelle se fait sentir le mouvement des vagues et des courants. Bien que nous ayons fixé sa limite à vingt mètres, sauf circonstances extraordinaires, le roulement est déjà fortement atténué au delà de dix mètres. La présence de sables à des profondeurs plus grandes est due pour une beaucoup plus grosse part à l'enlèvement des parties fines qu'à l'apport abondant des grains minéraux. Cependant les sables, les galets, et même les pierres, peuvent être directement transportés au large par divers agents dont le plus actif est la glace. Le phénomène est particulièrement distinct dans les régions polaires. Un bel exemple en est fourni par les bancs de Terre-Neuve dont les matériaux viennent non pas comme on l'a cru longtemps, du Groenland d'où ils auraient été amenés par les icebergs, mais des côtes mêmes de l'île de Terre-Neuve d'où ils sont arrachés par la gelée et apportés par les glaces côtières. Celles-ci se forment tout contre le rivage en englobant les masses grosses ou petites de roches alternativement mouillées par la marée et abandonnées au contact de l'air froid qui les congèle et les émiette. Chaque année elles sont poussées un peu plus

loin du bord pour cette double raison que le bloc diminue de volume à cause des intempéries et que, à mesure qu'il avance, la glace plus épaisse qui l'enveloppe est plus forte pour le soulever. Quand les glaçons sont assez éloignés du bord pour être pris par les courants côtiers, au moment de la débâcle, ils descendent vers la sud jusqu'au moment où ils heurtent le Gulf-Stream chaud qui leur barre perpendiculairement le passage ; il fondent et laissent tomber leur chargement de gravier et de cailloux qui s'accumule sur le fond.

D'autres blocs, dans les mers peu profondes comme la Manche, sont mis à nu par les courants et l'agitation des flots. Ils n'ont pas été apportés ; ils préexistaient dans le sol. D'autres ont été transportés entre les racines d'arbres déracinés et entraînés à la mer par les grands fleuves, saisis ensuite par les courants et amenés au large ; d'autres enfin, de dimensions moindres, avalés par des phoques ou par des pingouins, ainsi que Murray l'a observé, sont abandonnés à des distances considérables de leur lieu d'origine ; il est possible que certains soient les débris de roches volcaniques éjectées sur place. Quel qu'ait été leur mode de transport, les fragments rocheux sont rares dans les fonds dépassant 200 ou 300 mètres et éloignés de plus d'une cinquantaine de milles des côtes. Et, passant à des grains de plus en plus fins, des minéraux peuvent être entraînés très loin dans la mer par des coups de vent dans les régions à poussières, comme au large de la côte nord-ouest de l'Afrique ou de l'Australie. En tous cas, l'éloignement du lieu de départ dépend évidemment de la puissance de l'agent transporteur d'une part et, d'autre part, de la dimension et de la densité du fragment.

Certains dépôts côtiers sableux résultent plutôt du lavage par les courants marins de fonds plus ou moins vaseux. C'est ainsi que le sol du détroit de Gibraltar et celui des Dardanelles sont sableux et que celui recouvert par le Gulf-Stream est constitué par un sable corallien bordé de chaque côté par une bande de vase molle. On trouve aussi du sable au-dessous du point de rencontre de deux courants opposés et souvent l'accumulation des sédiments sur un

espace restreint donne naissance à des bancs peu profonds qui même quelquefois s'élèvent jusqu'au niveau de la mer. Les bancs formés sous l'influence d'une cause variable subissent les effets de ces variations. Tel est le cas de ceux du Pont d'Adam, dans le détroit de Palk, entre Ceylan et le continent, qui oscillent entre deux positions d'ailleurs toujours les mêmes, selon le régime alternatif de la mousson dans les deux moitiés de l'année. Les fonds de mers peu profondes où l'eau est fortement agitée, comme la Manche et la mer du Nord, sont généralement sableux; au contraire, quand la profondeur augmente, même dans les mers sableuses, les vases s'accumulent dans les creux où elles trouvent un abri contre l'agitation des flots. C'est l'explication de l'existence des fonds vaseux de la côte de Norvège.

Il serait intéressant que des essais synthétiques fussent effectués sur les minéraux, d'ailleurs peu nombreux, les plus fréquents dans les roches, micas blanc et noir, amphibole, pyroxène, quartz, feldspaths et calcaires de coquilles ou de coraux. On serait renseigné sur la résistance de chacun d'eux aux diverses actions destructives de l'eau, action décomposante chimique, action de dissolution et frottement. On parviendrait sans doute, pour des grains d'espèces et de grosseur déterminées à une notion sur la durée de leur séjour dans l'eau ou, pour les grains roulés, sur la longueur et la vitesse avec laquelle a été accompli le trajet suivi par eux.

Au delà de la zone des sables s'étend celle des vases de moins en moins sableuses à mesure qu'on s'avance davantage vers la haute mer. La règle n'est pas sans des exceptions que le bon sens se charge le plus souvent d'expliquer, par exemple en face des points où un grand fleuve pénétrant avec un courant violent dans une mer tranquille, chasse au loin les sédiments qu'il charie. Le Mississipi en dépose à une distance de 200 kilomètres de son embouchure, le Congo jusqu'à 400 ou 450 kilomètres. Les fonds, quels qu'ils soient, sont d'autant plus variés sur un même espace qu'ils sont plus près de terre. Chacun d'eux est le résultat d'une somme d'actions susceptibles de présenter individuellement d'assez grandes variations sans que leur total change sensiblement, de

sorte que le fond lui-même avec l'ensemble des variables, nature et dimensions des grains, limites de son étendue, reste immuable. J'ai constaté le fait dans l'Iroise, à la pointe occidentale extrême de la France, au confluent de l'Atlantique et de la Manche, dans des parages continuellement agités, semés d'îles et de rochers, sillonnés par de violents courants. Nulle région n'est le théâtre du conflit de conditions en apparence plus variables et ne pourrait être mieux supposée posséder des fonds plus changeants au même point ; cependant quand je l'ai observée, trente-cinq années après le commandant de Roujoux qui l'avait si remarquablement étudiée, je n'y ai point trouvé de changement. Certes, en un même point les grains de sable eux-mêmes ne doivent point rester longtemps, mais quoique se renouvelant sans cesse, comme le total des conditions demeure identique, il en résulte que rien ne change, ni la dimension ou la nature minéralogique des grains, ni les limites de leur aire de dispersion.

Il y a trois types de vases terrigènes, les bleues, les vertes et les rouges : les unes et les autres riches en grains minéraux qu'on distingue mieux en soumettant l'échantillon à l'action d'un acide faible. Le dépôt des sédiments est facilité par cette action moléculaire dont il a été déjà parlé et qui provoque la chute rapide dès leur arrivée en eau salée des matériaux pulvérulents apportés par l'eau douce des fleuves. Les particules vaseuses descendent rapidement sur le fond où elles sont protégées contre les vagues et les courants qui tendraient à les entraîner.

Les vases bleues sont caractéristiques des côtes surtout schisteuses des pays tempérés ; leur couleur résulte de la présence de matières organiques et du sulfure de fer ; elles couvrent le fond de la Méditerranée et de l'océan Glacial du Nord. Lorsque les conditions ambiantes sont favorables à la peroxydation du fer, elles se transforment en vases rouges bien moins riches en matières organiques. On s'explique ainsi le développement des vases rouges près des côtes tropicales et pourquoi le dessus des couches de vase bleue est toujours transformé en vase rouge sur une mince épaisseur. Une autre variété de vase rouge possède

une genèse différente, car elle est apportée par les fleuves drainant un bassin où abonde la latérite, ce produit de décomposition à l'air des roches continentales ferrugineuses. Tel est le cas pour la côte du Brésil bordée de vase rouge, pour celle de l'embouchure du Congo, et enfin pour celle de l'embouchure du Yang tsé Kiang dont les dépôts sont plus jaunes. La glauconie manque dans les vases bleues.

Les vases vertes renferment au contraire des grains de glauconie d'un vert si foncé qu'ils en paraissent noirs. On les observe le long des côtes rocheuses où ne débouche aucun fleuve. Dans les endroits lavés par des courants, ces vases vertes se dépouillent de leurs particules les plus fines et il reste un sable glauconieux dont la formation se rattache à la présence de foraminifères, c'est-à-dire dont la genèse est en partie organique.

Toutes ces vases sont pauvres en calcaire, sauf près des côtes calcaires et particulièrement crétacées dont les débris se déposent non loin de leur lieu d'origine. Elles s'enrichissent alors en carbonate de chaux soit par apport de calcaire provenant de la côte voisine, de sorte qu'il se produit une véritable marne, soit par la décomposition du gypse au moyen de la matière organique azotée, d'où résulte une précipitation de carbonate de chaux — peut-être les bactéries jouent-elles un rôle plus important qu'on ne le croit dans le phénomène, — ou enfin par un mélange de calcaire organique, conséquence d'un apport de coquilles plus ou moins moulues ou d'une chute de foraminifères.

La nature d'un fond, surtout en eau peu profonde, est en relation étroite avec les êtres vivants qui le peuplent. C'est pourquoi il est si indispensable pour les pêcheurs de posséder des cartes lithologiques. Flore et faune diffèrent si bien qu'en se promenant le long d'une plage et en examinant les débris apportés par les vagues, il suffit d'un peu d'habitude pour se faire un aperçu de la constitution et de la profondeur des fonds marins voisins. Les zostères couvrent les fonds vaseux, les fucus annoncent les fonds rocheux, les coquilles *Littorina* et *Rissoa* indiquent la présence de pierres, les *Cardium* et les *Myes* les fonds sableux. Tandis que les algues

vertes ne croissent pas au-dessous de 10 mètres, les zostères et les algues rouges vont de 5 à 18 mètres, les vases noires d'algues décomposées de 10 à 20 mètres.

Les fonds volcaniques constituent une variété particulière des fonds terrigènes.

Le sol sous-marin, surtout dans certaines régions comme l'axe de l'Atlantique, le voisinage de la Sicile dans la Méditerranée, les Cyclades dans l'Archipel, l'archipel Malaisien et l'Océan Indien, est semé d'évents volcaniques. Les uns émergent au-dessus de l'eau et alors on a une île volcanique ; tantôt ils apparaissent pour disparaître ensuite comme l'île Julia près de la Sicile ou Sabrina près des Açores, entre San Miguel et Terceira ; tantôt enfin ils donnent lieu à des éruptions sous-marines se traduisant à la surface par des tremblements de mer et au fond par des formations particulières manifestant un relief spécial sur lequel l'attention commence à se porter. Les phénomènes volcaniques sous-marins ont nombre de points de ressemblance avec les phénomènes volcaniques subaériens, ce qui n'a rien d'extraordinaire et cependant ils s'en distinguent. Les différences sont dues à la colonne d'eau souvent énorme qui recouvre l'orifice par lequel s'est effectuée l'éjection des matières et masque, jusqu'à les rendre imperceptibles à la surface, les dégagements gazeux de la profondeur. Sous de telles pressions, les gaz sont dissous, la nature même, la structure des produits éjectés sont modifiées. Il se produit un échauffement de l'eau en contact immédiat avec le fond qui donne naissance à des courants profonds se faisant sentir jusqu'à la surface si l'éruption est très forte et qui ont été observés lors de la catastrophe de la Martinique en 1902. L'élévation de la température n'a pas été mesurée exactement et néanmoins le fait est indiscutable puisque l'enveloppe goudronnée des câbles sous-marins brisés traversant ces parages a été ramenée fondue. Ils produisent des changements brusques dans la nature lithologique du fond. Très violents, ils poussent devant eux des masses de sédiments sableux voisins de l'orifice et comme ils ne tardent pas à s'atténuer, ils laissent ces sables si caractéristiques se déposer sur le lit marin vaseux des

grands fonds. Le phénomène volcanique prenant fin, il en est aussitôt de même du courant et par conséquent de l'apport de sables. D'autres fois le courant volcanique profond, sans apporter lui-même de grains sableux, se borne à balayer les parties argileuses fines du dépôt déjà formé et à laisser sur place les grains de sable. La tranquillité revenue, le dépôt régulier des globigérines tombant en pluie de la surface recommence et recouvre la nappe volcanique. Ainsi s'expliquent ces intercalations de minces couches de sable si visibles sur un grand nombre de boudins de vases à globigérines ramenés par le prince de Monaco de l'archipel des Açores. Il y a là des phénomènes sur lesquels l'attention ne saurait trop être attirée; leurs moindres détails doivent être élucidés à cause de leur importance non seulement au point de vue de la science pure mais pour le profit qu'en doit retirer la télégraphie sous-marine en extrême besoin d'être renseignée sur la volcanicité de parages dangereux pour la sécurité des câbles.

Les abords des îles volcaniques sont caractérisés par des pentes le plus souvent variables avec la profondeur et parfois très brusques, car on en trouve de 62 degrés à l'île Saint-Paul; leur moyenne, comprise entre 7 et 14 degrés, est donc un peu plus atténuée que celle des volcans sub-aériens. Autour de ces îles toujours isolées, les sédiments se succèdent d'après la loi ordinaire, par ordre de grosseur. Sur les plages, les fragments ramenés par les vagues, broyés, usés par le ressac, triés par le jeu des marées, donnent naissance à de remarquables localisations minérales du genre des sables de fer magnétique reconnus à la Réunion ou ceux riches en olivine ou en sanidine qu'on trouve sur la côte d'Italie, au pied du Vésuve.

Les sables volcaniques s'étendent sous les eaux au moins jusqu'à 900 mètres de profondeur; leur composition se reconnaît du premier coup d'œil au microscope. Les grains sont anguleux, il y a abondance de fragments scoriacés, de grains vitreux d'obsidienne plus abondants encore si l'éjection a été sous-marine. L'obsidienne s'attaque assez facilement au contact de l'eau de mer de sorte que

si leurs dimensions dépassent celles d'une noix ou d'un pois, la surface jusqu'à une certaine profondeur, en est transformée en une masse rougeâtre ferrugineuse appelée palagonite dont le centre est un noyau vitreux. On trouve aussi beaucoup de fragments ponceux très menus, d'autres anguleux, opaques, d'un rouge jaunâtre plus ou moins foncé et ressemblant à de la brique pilée, des fragments basaltiques de feldspath blanc criblés d'une multitude de grains noirs très fins de magnétite et, comme minéraux isolés, de l'hornblende, de l'olivine, du pyroxène augite, de la magnétite, de la fayalite et du mica noir. La glauconie en est toujours absente et le quartz extrêmement rare ; quant au calcaire, sa proportion faible dans les véritables fonds volcaniques, augmente à mesure qu'on s'avance vers la haute mer tandis que les grains sableux deviennent de plus en plus fins. Le tout se transforme en vase volcanique brune ou grise à laquelle se mêle, comme dans tous les grands fonds, une quantité de plus en plus forte de globigérines descendues de la surface.

En les cherchant bien, on trouve dans tous les fonds des traces de minéraux volcaniques et c'est pour ce motif que Murray a supposé que, sur le lit océanique tout entier, les éléments volcaniques jouaient un rôle prépondérant. L'hypothèse paraît excessive. En définitive l'hornblende, le pyroxène, le mica, le fer magnétique, la fayalite ne se rencontrent pas que dans les roches volcaniques ; ils abondent dans les roches basiques cristallines très répandues sur les continents et qui n'ont rien de volcanique, avec le quartz et le feldspath qui, le premier surtout, ne manquent pas dans les fonds marins. Quels autres minéraux voudrait-on trouver ? Quant aux ponces que j'ai d'ailleurs cherchées vainement dans bien des fonds cependant assez voisins de régions volcaniques comme sur les côtes du Maroc, entre les Canaries et les Açores, ou à l'ouest des îles du Cap-Vert, il n'y a pas à douter que dans certaines circonstances, elles ne puissent être entraînées sous-marinement à d'énormes distances de leur lieu d'origine.

Ces ponces sont disséminées sous deux états : en particules très fines aisément reconnaissables à leur aspect fibreux et bulleux,

ainsi qu'en fragments de la dimension des deux poings. Quand une éruption ponceuse a lieu au fond de la mer, les roches, criblées de vacuoles arrivant brûlantes au contact de l'eau, subissent un étonnement qui agit à la fois chimiquement en oxydant fortement leur périphérie, laquelle prend une couleur rouge avec une apparence scoriacée ou terreuse et, mécaniquement, en détruisant leur cohésion. C'est pour l'obsidienne, le phénomène des larmes bataviques. Il en résulte qu'une masse ponceuse est transformée en particules rouges très fines et même en boue, tandis que le noyau qui en occupe le centre, étant protégé, conserve sa nuance blanc grisâtre bien connue et son aspect caractéristique. Le noyau a été cependant plus ou moins pénétré par l'eau qui, à la suite du refroidissement, a en partie rempli ses vacuoles. Suffisamment imbibé pour être plus lourd que l'eau, il est resté sur le fond et a pu être chassé au loin par les courants consécutifs à l'éruption. S'il a conservé encore quelques vacuoles vides, il s'est élevé à une certaine hauteur au-dessus du fond jusqu'au moment où, demeurant en parfait équilibre de flottaison dans une couche d'eau déterminée, il subit l'action de courants supérieurs qui le font voyager entre deux eaux pendant un temps très long. Les gaz contenus se dissolvant peu à peu, il s'alourdit et se rapproche lentement du sol où il finit par se déposer. Si les plus fines particules de ponce blanche ayant été en contact avec l'air ont chance de tomber immédiatement sur le fond, un fragment, dans les mêmes conditions, n'y descendra presque jamais. Fût-il à peine gros comme une noisette, il flottera à la surface de la mer, semblable à un bouchon, jusqu'au moment de son échouage sur une plage, peut-être séparée par des centaines de lieues de son point d'origine. Alors, par suite de son extrême fragilité, il sera immédiatement détruit par le frottement contre le sable et les galets. J'ai fait l'expérience et je conserve des fragments continuant à surnager après quatre ou cinq ans d'immersion dans l'eau. Léger et friable, rien n'est plus résistant qu'un fragment de ponce isolé tant qu'il flotte à la surface des vagues ; dès qu'il aborde la terre où il parvient toujours tôt ou tard, il est immédiatement pulvérisé et anéanti, car ses débris sont telle-

ment fins qu'ils deviennent indiscernables au milieu des galets, des graviers et des grains de sable.

Les pierres ponces éjectées en poussière infiniment fine pendant les éruptions volcaniques aériennes jouent probablement un autre rôle dans la constitution des fonds marins. Leurs grains, à cause de leur extrême petitesse, subissent dans l'air humide, au milieu des vapeurs aqueuses brûlantes sortant de l'orifice du volcan, la même modification que les grains plus gros chauffés et projetés dans l'eau. Ils rougissent, augmentent de volume, c'est-à-dire prennent une densité encore plus faible, sont entraînés dans les plus hautes régions de l'atmosphère où ils causent les colorations rouges du ciel signalées au coucher du soleil lors de l'éruption du Krakatau si riche en matériaux ponceux. Tôt ou tard, ils retombent à la surface du globe non plus à l'état de ponce, mais de matière argileuse amorphe que le contact de l'eau transforme immédiatement en boue.

Les fonds d'origine organique proviennent de végétaux et d'animaux. Déjà le long des rivages sur un terrain mouillé par les embruns chassés par le vent et contenant par conséquent une forte proportion de sel, la flore est particulière et il n'est pas besoin d'être botaniste pour saisir les différences considérables qui existent entre la végétation continentale ordinaire et celle des dunes, des plages sableuses et des rochers. On a établi des catégories parmi ces diverses flores ; nous n'avons pas à traiter ces questions. Nous nous bornerons à mentionner les plages à palétuviers si caractéristiques de certaines contrées. Croissant sur les terres basses des régions tropicales, en forêts épaisses, quelquefois de plusieurs kilomètres, à la côte d'Afrique ou du golfe du Mexique, à l'embouchure des grands fleuves comme le Congo ou le Gange, sur ce terrain marécageux qui n'est plus la terre et pas encore la mer, les arbres étendent l'inextricable réseau de leurs racines aériennes toutes couvertes d'huîtres et entre lesquelles pullule une immonde population de crustacés et de reptiles, depuis les crabes jusqu'aux monstrueux crocodiles et aux tigres mêmes qui, dans les jungles des Souderbund, passent à la nage d'un îlot à un autre.

Dans la mer, là où le sol est continuellement inondé, la végétation change encore pour devenir franchement marine et elle se continue jusque vers 400 mètres de profondeur, extrême limite de la zone diaphane où la lumière solaire pénétrant à travers l'eau va permettre au végétal de fabriquer sa chlorophylle. Ces plantes benthiques sont des algues divisées en trois familles, les vertes, les brunes telles que les fucus, les laminaires dans les mers septentrionales ou les gigantesques *Macrocystis* aux tiges dépassant quelquefois 200 mètres dans les mers chaudes et qui habitent le fond jusque vers 85 mètres de profondeur, enfin les algues rouges ou floridées parmi lesquelles se trouvent, jusque par 70 mètres de profondeur, les nullipores ou algues calcaires.

Ces dernières jouent un rôle lithologique considérable. Il semble qu'au fond des mers, elles seules fabriquent des sols compactes et durs. Elles sont abondantes sur les côtes de Bretagne où elles constituent le maërl et bien plus encore dans les mers chaudes où les corallines, les lithothamnies, les chlorozoosporées prospèrent jusque par 200 mètres de profondeur. Près des îles du Cap-Vert, la drague revient chargée à se rompre de leurs nodules grossièrement sphériques et, ayant à peu près la grosseur du poing. Leur végétation qui est une fabrication de calcaire, s'effectue avec une prodigieuse rapidité et, quand les circonstances sont favorables, elles s'étendent sur d'immenses espaces grâce à la dissémination de leurs spores par les courants. Elles abondent aussi autour des îles de corail où elles contribuent à consolider, en les cimentant entre eux, les débris coralliens rameux ou fragmentaires.

La flore planktonique se compose d'algues chromacées, calcocytées et murracytées, qui secrètent du calcaire et de diatomées qui élaborent de la silice ; les dépouilles de ces dernières couvrent une vaste étendue du lit océanique, principalement dans les régions polaires antarctiques.

La lumière ne pénétrant pas dans les eaux à plus de 400 mètres, au delà règne une obscurité complète. Comme la lumière solaire est indispensable à la vie végétale, c'est dans la région superficielle et dans une zone moindre de 400 mètres d'épaisseur que

demeure cantonnée la flore planktonique des algues dont la portion calcaire ou siliceuse, après la mort de l'être organisé, tombe sur le fond et s'y entasse, passant en quelque sorte, par le fait même de la cessation de la vie, du règne organique au règne organique, de l'état de végétal à celui de minéral. Parmi les algues, il en est qui, nées à la surface, peuvent descendre au fond et pourtant continuer à y vivre et à s'y accroître en profitant des réserves de matières nutritives qu'elles avaient accumulées en elles et, en effet, on a trouvé des algues *Halosphœra* jusque par 2 000 mètres. Sous l'influence de la lumière et de leur force vitale, ces plantes s'emparent de l'acide carbonique et de l'azote provenant de la matière organique vivante destinée à servir de nourriture au plankton animal : péridiniens, foraminifères et radiolaires. Celui-ci, à son tour, alimentera les copépodes qui eux-mêmes sont la nourriture ordinaire des poissons et en particulier de ceux dont les pêcheurs cherchent à s'emparer. Ces algues sont donc la première étape de la vie organique. Là ne se borne pas leur rôle. Par d'autres recherches analytiques, Murray et Irvine sont parvenus à prouver que les diatomées s'assimilaient l'argile dont les eaux marines contiennent une certaine quantité en suspension, car dans un mètre cube d'eau de l'Atlantique nord, on en a trouvé 5,29 g. et 6,6 g. dans la même quantité d'eau de la Méditerranée. Accomplissant un acte qui, pour être effectué artificiellement dans un laboratoire, exige l'emploi de procédés les plus énergiques de la chimie, elles décomposent ce silicate, s'approprient sa silice et en fabriquent leur carapace ou frustule qui est de la silice à l'état d'opale. Ces mêmes frustules siliceuses mélangées sur le fond à l'énorme quantité de carbonate de chaux qui s'y trouve, ajoutées à l'opale des spicules d'éponges et des radiolaires vont, sous l'action des forces moléculaires, tendre à s'agglomérer autour de centres d'attraction constitués surtout par des débris de corps organisés et elles formeront les rognons de silex si abondamment répandus dans les couches de craie où, toujours sous l'empire de l'attraction dont la sphère d'activité est ainsi délimitée, ils se disposent en séries de bandes parallèles pareilles

à celles qui s'étagent sur la paroi verticale à pic des falaises normandes. Les algues extraient de l'eau de mer le carbonate de chaux et la silice en proportion cependant très faible, puisque ce dernier corps n'y entre que pour 0,001 à 0,017 pour mille.

Nous ne parlerons que de trois sortes d'algues de haute mer, les chromacées, les calcocytées et les diatomées et encore nous bornerons-nous à citer les premières, les chromacées, algues unicellulaires non calcaires n'ayant que 0,001 mm. à 0,012 mm. de diamètre, vivant dans les mers froides dont elles colorent de grandes étendues en brun ou en vert et où elles sont la principale nourriture des copépodes. Peut-être en existe-t-il dans les mers chaudes. Au milieu de l'archipel du Cap-Vert, près de l'île de Maïo, s'étend un assez vaste espace où l'eau présente une teinte vert jaunâtre opaque et où les fonds, par des profondeurs de 875 et 1311 mètres, sont remarquablement riches en matière organique dont ils contiennent respectivement sous forme d'ammoniaque, 1739 et 692 milligrammes par kilogramme. La région, que j'ai traversée en 1903, serait intéressante à étudier pour un spécialiste.

Les calcocytées sont de petites masses rondes de matières protoplasmique de nature albuminoïde entourées de disques ou plaquettes calcaires dites coccolithes ayant environ 0,01 mm. de longueur, de sorte que l'ensemble offre l'aspect d'une boulette appelée coccosphère. Les rhabdosphères sont des masses de matière organique empâtant un réseau globulaire de rhabdolithes, fins spicules calcaires menus comme de la dentelle et de la plus merveilleuse symétrie. Ces algues pélagiques vivent à la surface et jusqu'à une faible profondeur. Les coccosphères peuplent les eaux chaudes tropicales et s'avancent au Nord et au Sud tant que la température des eaux ne s'abaisse pas au-dessous de 8 degrés ; elles sont surtout abondantes dans les zones tempérées, en dehors des régions côtières d'où elles sont absentes. On trouve partout leurs dépouilles sauf par conséquent dans les régions polaires et principalement dans les dépôts abyssaux. Cependant leur distribution est assez irrégulière et quelquefois elles manquent totalement dans des eaux que l'on aurait supposées devoir en contenir. D'autres fois

elles se trouvent en telle abondance qu'elles formaient 20 p. 100 d'un sédiment recueilli par 750 mètres entre Sydney et la Nouvelle-Zélande.

Les rhabdosphères, abondantes dans les mers équatoriales et tropicales, se font rares ou disparaissent dès que la température des eaux de surface descend au-dessous de 20 degrés. Leur extrême fragilité les rend difficiles à découvrir entières dans les échantillons mais on reconnaît assez aisément les fragments brisés de leurs rhabdolithes.

Les diatomées, malgré leurs dimensions infiniment petites puisqu'il en faut plus de un million pour peser un gramme, sont la plus abondante source de la silice d'origine organique des dépôts marins. On a en effet calculé qu'une seule d'entre elles, en quatre jours, était susceptible de donner naissance à 70 millions d'individus. Elles servent de nourriture aux animaux marins, aussi bien dans les eaux superficielles ou voisines de la surface que dans les profondeurs car, tombées sur le fond, elles possèdent encore suffisamment de matière nutritive pour l'alimentation de la faune benthique. Elles vivent dans les eaux douces, saumâtres et salées, plutôt dans celles dont la salure est atténuée à l'embouchure des fleuves ou dans les régions antarctiques recevant les eaux de fusion de glaces terrestres. Planktoniques et benthiques, elles flottent à la surface ou par faibles profondeurs. On comprend que les espèces de cette dernière catégorie demeurent cantonnées dans les eaux côtières. Elles consistent en une cellule unique enfermée dans une enveloppe siliceuse ou frustule en opale ayant la forme de deux valves s'emboitant l'une dans l'autre. Il arrive qu'on découvre dans la mer ou dans les fonds des diatomées d'eau douce apportées par les fleuves et que les courants ont ensuite entraînées en haute mer. Ehrenberg a reconnu qu'elles constituaient la sixième partie du volume total des poussières rouges du Sahara chassées par les vents sur la côte ouest de l'Afrique septentrionale.

Les diatomées se rencontrent dans les eaux tropicales où elles présentent leurs dimensions maximum, mais leur frustule y est extraordinairement mince. La nuit, elles montent à la surface pour

s'enfoncer le jour à une profondeur de 28 ou 30 mètres. C'est ainsi qu'on l'a observé dans les mers de Soulou et d'Arafura. Elles pullulent dans les eaux froides qui, par exemple, baignent les côtes de l'Amérique du Nord et dans celles de l'océan Antarctique qu'elles colorent en vert foncé. On en a vu en immenses bancs longs de plusieurs kilomètres sur une épaisseur de quelques mètres. Cependant, dans un même océan, à la même place, leur abondance peut être très variable à diverses époques de l'année.

Les dépouilles siliceuses de diatomées se reconnaissent dans la plupart des sédiments marins, bien qu'elles soient rares ou même absentes dans beaucoup de vases à ptéropodes et à globigérines, dans les boues coralliennes et dans les argiles de grands fonds. Leurs frustules, si fragiles, sont la plupart du temps brisées. Entre le cercle antarctique et 40 degrés latitude Sud environ, sur une surface évaluée à 28 millions de kilomètres carrés, elles forment jusqu'à 50 pour 100 du poids total des échantillons du fond. La vase à diatomées humide est jaune clair ou jaune crème ; désséchée elle est blanche, prend une structure feuilletée et s'écrase en farine sous les doigts. Elle contient de 2 jusqu'à 36 p. 100 de calcaire.

On ne saurait manquer de mentionner à propos de la flore océanique, deux particularités intéressantes : la mer des Sargasses et la présence au fond des eaux de végétaux qu'on n'aurait guère soupçonnés devoir s'y trouver.

La mer des Sargasses occupe dans la portion centrale de l'Attique nord une aire de 4 500 000 kilomètres carrés. Cet espace est couvert de radeaux de dimensions variables constitués par un enchevêtrement de sargasses, algues que les marins désignent aussi sous le nom de raisins des tropiques. Ces plantes croissent sur les côtes orientales de l'Amérique centrale depuis le cap Cod jusqu'à la Trinidad, en y comprenant les grandes et les petites Antilles. Arrachées aux rochers par les vagues pendant les mauvais temps, elles sont saisies par le Gulf-Stream qui les entraîne dans son grand circuit de l'hémisphère nord ; petit à petit elles tendent à en gagner les portions centrales, immobiles et calmes, où elles forment ces bancs flottants qui avaient effrayé les matelots

de Christophe Colomb et, bien avant eux, les marins arabes et carthaginois. Comme les sargasses voyagent toujours entourées de la même gaine d'eau, leur développement s'arrête et elles finissent probablement par tomber sur le fond où elles apportent au benthos une provision de matière nutritive.

La dissémination sur le fond de débris végétaux existe dans tous les océans mais nulle part plus que dans le golfe du Mexique où le *Blake* a dragué par 2 750 mètres de profondeur, à des distances de terre variant entre 10 et 15 milles, des masses de feuilles d'arbres, des tiges de bambous, de cannes à sucre, des poissons, des crustacés et des annélides d'eau douce, des coquilles terrestres que, d'après Agassiz, les ouragans avaient emportés à travers les airs et laissé retomber à la mer. J'ai recueilli en plein golfe de Gascogne, par 700 mètres, des tiges de *Tipha* et des branches de bois d'aulne. Un dragage exécuté au large des côtes du Maroc a rapporté un noyau de pêche, un autre dragage un tuyau de pipe. Dans un boudin de fond découpé au tube Buchanan à 5 milles S. W. de Fogo des îles du Cap-Vert, était empâté un maillon de chaînette en cuivre. Si les terrains aujourd'hui submergés émergent jamais et deviennent des couches géologiques et si, à cette époque, il y a encore des paléontologistes, l'examen des nouvelles roches ne laissera certainement pas de leur offrir des problèmes dont la solution exigera toute leur sagacité ou risquera d'éveiller toute leur imagination.

Le règne animal de même que le règne végétal contribue à former des fonds calcaires et des fonds siliceux. Les foraminifères, ptéropodes, hétéropodes, les éponges calcaires, les crustacés, les coraux, les brachyopodes, les bryozoaires, les échinodermes, les mollusques et les poissons, par leurs débris, donnent naissance à des dépôts calcaires tandis que les radiolaires et les éponges siliceuses, s'assimilant la silice dissoute dans l'eau de mer, la rendent après leur mort au sol sous-marin, sous forme d'opale, c'est-à-dire de silice hydratée bien moins résistante à la dissolution que la silice anhydre du quartz.

Les dépôts calcaires d'origine animale sont de beaucoup plus

abondants que les dépôts silicieux d'origine animale qui, à vrai dire, ne sont guère que des débris très fins mélangés en quantité variable dans les vases. Ils commencent près de terre à l'état de dépôts détritiques et occupent environ le tiers de l'étendue totale de l'aire océanique. La proportion de calcaire d'un fond est une mesure grossière de l'intensité de la vie au sein des eaux qui le recouvrent immédiatement ou en sont voisines. Ainsi que l'avait écrit Linné, *omnis calx e vivo* et que, dans son ouvrage *Geschichte der Erde*, l'avait répété Mohr en l'appuyant par tant de preuves, tout calcaire est d'origine organique. Le calcaire déposé chimiquement est lui-même dû à une transformation du sulfate de chaux dissous par l'ammoniaque qui est d'origine organique.

La remarque est aussi bien applicable aux couches anciennes calcaires abandonnées par des océans depuis longtemps disparus. Au même point, pendant la durée de l'histoire de la terre, l'intensité de la vie a beaucoup varié, tantôt à peu près nulle comme pendant le dépôt des marnes du trias auxquelles ont succédé les calcaires jurassiques qui les recouvrent et sont caractéristiques d'une vie intense ou comme pendant que la craie se superposait aux marnes jurassiques. Des remarques de ce genre qui ouvrent brusquement des aperçus inattendus sur l'histoire du globe terrestre, obligent la géologie à ne pas rester descriptive, à cesser d'être une monotone énumération de faits pour se transformer en une reconstitution du passé. A la lumière de l'océanographie, l'attention est forcée de dépasser les faits et se porter sur leurs conséquences.

Les dépôts calcaires voisins de terre sont constitués par des débris entiers d'animaux ayant vécu sur place comme les bancs d'huîtres et de coquillages ou bien accumulés en des points spéciaux après avoir été brisés ou moulus par des courants. Chaque sorte de dépôt implique des conditions de genèse différentes et c'est pourquoi, sur les cartes lithologiques côtières, il importe de différencier afin qu'on en saisisse à première vue la distribution respective, les dépôts de coquilles vivantes ou entières, ceux de coquilles brisées ou enfin ceux de coquilles moulues.

Parmi les bancs côtiers de coquilles vivantes, les plus intéres-

sants, au point de vue de la pêche, sont les bancs d'huîtres qui habitent les fonds rocheux ou vaseux mais jamais les fonds sableux mouvants et dépassant la profondeur de 70 mètres. Ces mollusques craignent autant les eaux trop salées que celles qui le sont trop peu ; ils meurent dès que la salure dépasse 37 pour 100 ou est inférieure à 1,8 ; leur optimum d'habitat est une eau contenant 2 à 3 pour 100 de sel.

En Méditerranée, les dépôts coquilliers ne dépassent pas 1000 mètres de profondeur. On les trouve jusqu'à 900 mètres dans le détroit de Gibraltar, à 1000 mètres près de la Sardaigne tandis que dans la mer du Nord, ils sont à moins de 100 mètres et exceptionnellement à 100 mètres au plus. Le plateau de Pourtalès sur les côtes de la Floride, entre 160 et 540 mètres de profondeur, est tout couvert de débris calcaires. Ces débris anguleux sont dus bien moins à des actions de trituration par les vagues ou les courants qu'à des phénomènes de vie. En parcourant certaines plages, on est étonné de la conservation des coquilles qui les jonchent et y ont été apportées par les vagues ; elles sont usées et émousées par le frottement, mais non brisées. Les débris coquilliers anguleux proviennent de crabes et de poissons de proie qui broient entre leurs machoires les coquillages vivants ou même morts pour se nourrir de leur chair. Verill a reconnu des dépôts coquilliers clastiques à grains anguleux au-dessous du cours du Gulf-Stream, le long des côtes atlantiques de l'Amérique du Nord. A ce propos, il y a lieu de remarquer que, aussi bien pour les coquillages que pour les foraminifères, l'épaisseur de la coquille paraît être en relation avec la salure de l'eau ; dans la Baltique, par exemple, dont les eaux sont pauvres en calcaire, il arrive souvent que le test des mollusques ne consiste plus guère qu'en conchioline.

Les animaux qui contribuent le plus à la formation des fonds sont les rhizopodes divisés en trois groupes principaux ; les héliozoaires qui peuplent les eaux douces et dont nous n'avons, par conséquent pas à nous occuper, les foraminifères qui sécrètent du calcaire et les radiolaires qui font de la silice. Ceux qui viennent ensuite, loin derrière eux, sont les éponges aux spicules tantôt cal-

caires et tantôt siliceux et les Ptéropodes dont la coquille est quelquefois calcaire.

Les foraminifères comme les autres Protozaires, le plus simple des cinq types principaux qui divisent le règne animal, sont constitués, par du protoplasma et presque toujours possèdent une coquille calcaire à cavité simple ou divisée en loges communiquant entre elles par des ouvertures pratiquées dans les cloisons de séparation et presque toujours aussi percée d'une multitude de petits trous par où les pseudopodes, simples filaments de protoplasma, se projettent au dehors. Ces êtres ont des dimensions comprises entre 0,2 mm. et 0,7 mm. Leur test peut contenir jusqu'à 26 pour 100 de carbonate de magnésie ; chez les espèces qui résistent le plus à l'eau douce, il diminue d'épaisseur en même temps que s'abaisse la teneur en sel de l'eau, et il finit par se transformer en une mince enveloppe brune chitineuse. Le sarcode prend alors une nuance verte. Du reste, la couleur de celui-ci est variable, rose, blanche ou brune dans les eaux riches en diatomées, ce qui implique une faible salure. Dans celui des foraminifères, des radiolaires et des spongiaires, on a trouvé des grains de chlorophylle.

Les foraminifères sont répandus dans les mers du monde entier ; ils sont benthiques ou planktoniques ; les premiers sont plus souvent variés comme nombre d'espèces, mais le nombre des individus est restreint, sauf dans les mers peu profondes, tout au contraire des foraminifères planktoniques où une multitude d'individus est répartie entre un petit nombre d'espèces. Les foraminifères benthiques sont plus fréquents dans les eaux peu profondes que dans les dépôts abyssaux ; plusieurs se font une enveloppe des sédiments qu'ils trouvent sur le fond. Les foraminifères planktoniques appartiennent pour la plupart aux eaux tropicales ou subtropicales. Dans les eaux polaires, ils disparaissent ou prennent des formes naines. Ils vivent à la surface des eaux, mais y accomplissent des migrations dans le sens vertical jusque par 100 ou 150 brasses de profondeur.

Les dépouilles calcaires des foraminifères planktoniques parmi

lesquels les Globigérines et les Orbulines sont les plus répandus, tombent sur le fond après la mort de l'animal et, par leur entassement, donnent naissance aux vases à globigérines. Si on désignait sous ce nom toutes les vases renfermant des dépouilles de ces êtres, Murray fait remarquer que ce sédiment serait de beaucoup le plus étendu sur le sol océanique, et c'est pour cela qu'il n'attribue cette dénomination qu'aux vases en contenant au minimum 30 pour 100. Leur aspect est blanc, jaunâtre, grisâtre ou brunâtre selon la nature des sédiments minéraux fins qui y sont mélangés, le grain en est homogène ; séchées elles n'offrent que peu de liant. La teneur en calcaire atteint jusqu'à 97 pour 100. Traitées par un acide étendu, elles laissent un résidu brun, rouge, chocolat, noir, gris ou vert formé de squelettes siliceux de radiolaires, de spongiaires, de diatomées et de minéraux divers en grains d'autant plus fins que la vase est plus profonde. La vase à globigérines est surtout répandue dans l'Atlantique dont le fond en est presque entièrement recouvert, mais elle existe dans tous les océans ; la vie y est bien plus abondante que sur la vase à Radiolaires et sur l'argile rouge. Selon les parages, il y a prédominance de telle ou telle espèce. C'est ainsi qu'entre la Norvège et le Spitzberg, de 700 à 900 mètres de profondeur, le fond de la mer est recouvert par une argile brune passant à un sédiment très riche en biloculines qui descend jusqu'à 3 600 mètres. Cette vase à biloculines contenant de 6 à 55 pour 100 de calcaire et très pauvre en débris siliceux, ressemble à la vase à globigérines, à cette différence près que les biloculines y sont aussi abondantes et les globigérines rares que l'inverse a lieu dans les vases à globigérines.

La distribution des foraminifères sur le sol océanique soulève une question importante. En quelle mesure la nature des débris de ces animaux recueillis dans un fond est-elle en relation avec la distribution de ces mêmes animaux vivant dans les eaux recouvrant immédiatement ces fonds ou peu éloignés d'eux ? Comme la distribution des foraminifères vivants est en corrélation avec les conditions physiques et mécaniques de la surface, tempéra-

SONDAGES PAR PROFONDEURS MOYENNES A BORD
D'UN BATIMENT A VAPEUR

SONDAGES A LA MAIN, PAR PETITES PROFONDEURS

ture, salure et courants, on comprend tout son intérêt. Murray affirme que les localités où on les trouve au fond diffèrent peu de celles où ils existent à la surface de telle sorte qu'à la seule inspection des foraminifères qu'il contient, on est en état d'affirmer de quel océan, Atlantique ou Pacifique, provient l'échantillon, la latitude de son lieu d'origine et même sa profondeur. D'autre part, on ne saurait douter que pendant sa vie, un foraminifère ne soit emporté au loin par les courants et qu'il doit en être de même après sa mort tant que le sarcode encore existant et qui présente à la fois une grande surface et un faible poids spécifique offre une résistance faible à l'eau qui l'emporte. L'entraînement dure jusqu'au moment où le sarcode étant détruit et les gaz produits disparus, la carapace qui est du carbonate de chaux, tombe verticalement et rapidement sur le fond. Aussi rencontre-t-on souvent près des rivages des foraminifères pélagiques et inversement, dans les fonds abyssaux, des foraminifères côtiers, les uns et les autres chassés par les vents et les courants en dehors des limites de leur habitat ordinaire. On constate une fois de plus, en présence de ces contradictions d'opinions, combien l'océanographie a besoin encore de recherches exécutées par des spécialistes qui résumeront ensuite leurs longues et pénibles études en une loi dont l'énoncé ne tiendra peut-être que quelques lignes mais sur laquelle on pourra se fier.

Les radiolaires fréquentent surtout la haute mer et préfèrent les eaux chaudes et relativement tranquilles du Pacifique, quoique certains vivent dans des eaux à température ne dépassant pas 5 degrés. Ils sont abondants dans la portion sud-ouest du Pacifique et au milieu de l'archipel Malais ; il en existe dans l'Atlantique dont ils colorent légèrement les eaux, mais dans cet océan, on a surtout affaire à des acanthomètres, radiolaires constitués par des piquants rayonnant autour d'un centre, très fins et par conséquent très difficiles à retrouver, sans compter que leur délicatesse facilite leur dissolution dans l'eau. Les polycystines à test treillagé résistent mieux.

Ces organismes siliceux peuplent toutes les zones de l'océan et particulièrement l'extrême surface et l'extrême fond. Ceux de

la surface s'enfoncent de 20 à 30 brasses selon les conditions ambiantes. D'une façon générale, leur habitat est diamétralement inverse de celui des diatomées, car ils ne s'écartent guère de la zone tropicale. Pour les pêcher, il faut que la mer soit parfaitement calme, le temps modérément chaud, clair, quoique pas trop lumineux, bien que certaines espèces flottent sur la mer par plein soleil, ce qui est rare parmi ces animaux. Aussitôt que l'eau commence à être agitée, ils regagnent la profondeur et il en est de même lorsque l'eau s'adoucit ou est souillée de boue. Ils servent de nourriture aux animaux pélagiques, ptéropodes, méduses, céphalopodes et poissons dans les coprolithes desquels on les retrouve. Ainsi s'explique d'abord la dissémination des restes de radiolaires dans les fonds de régions au-dessus desquelles ils n'habitent pas, et ensuite la fréquence du phosphate de chaux dans les vases à radiolaires où sa proportion oscille entre 0,65 et 39 pour 100.

La vase à radiolaires couvre des aires d'étendue restreinte dans les portions tropicales de l'océan Indien et du Pacifique ; elle n'existe pas dans l'Atlantique. De couleur rouge, brune ou parfois simplement jaunâtre, elle est moins plastique que l'argile rouge à laquelle elle ressemble beaucoup. Sa composition chimique est assez variable ; quelquefois elle ne contient qu'une quantité si faible de carbonate de chaux qu'elle fait à peine effervescence à l'acide, tandis que d'autres fois sa teneur s'élève à 20 pour 100. Elle renferme beaucoup d'oxydes de fer et de manganèse, — ce dernier en forme de nodules et particulièrement abondant à la partie supérieure des boudins rapportés, — ainsi que des fragments palagonitiques. En définitive, Murray a donné le nom de vases à radiolaires à des argiles rouges contenant de 20 à 80 pour 100 de squelettes siliceux et comme il admet que la silice en filaments très fins et d'ailleurs à l'état d'opale, c'est-à-dire très attaquable, est susceptible de se dissoudre lentement, on voit que les vases à radiolaires passent par degrés insensibles aux argiles rouges. Beaucoup de dépôts contiennent des radiolaires, nulle part à eux seuls ils ne forment un dépôt.

Les éponges sont des zoophytes de la classe des Spongiaires. Leur corps est une masse parenchymateuse percée d'un système de canaux et soutenue par une charpente de spicules calcaires chez certaines espèces, siliceux chez d'autres. Les spicules calcaires sont simples ou présentent trois ou quatre rayons ; les spicules siliceux offrent la plus grande diversité et se présentent en filaments percés d'un canal central, en aiguilles, fuseaux, crochets ou ancres. Les éponges appartiennent au benthos et vivent jusqu'à 4 000 mètres, mais comme leurs embryons nagent librement, leur aire de dispersion est assez vaste. Quoiqu'ils soient constitués par de l'opale contenant de 7 à 13 pour 100 d'eau et résistant mal à l'action dissolvante de l'eau, les spicules se trouvent dans tous les fonds marins, surtout siliceux. La vase à diatomées est particulièrement favorable au développement des éponges tétractinellides ; les éponges tétractinellides et monactinellides habitent plutôt les eaux peu profondes. La faune d'éponges des îles de corail est très riche.

Les ptéropodes sont des mollusques céphalophores nus ou recouverts d'une coquille calcaire extrêmement mince et peu résistante ; ils sont munis de nageoires en forme d'ailes développées de chaque côté du cou et leur bouche est armée de puissantes mâchoires. Ces animaux qui se nourrissent de radiolaires peuplent surtout les mers chaudes, la mer des Caraïbes, par exemple, et les courants chauds ; dans les mers froides, ils sont rares et privés de coquille. Pélagiques, ils montent le soir à la surface pour redescendre ensuite dans la profondeur au moyen de leurs ailes. On les trouve vivants depuis la surface jusqu'à 1 300 mètres ; leurs dépouilles, abondantes dans beaucoup de sédiments tropicaux peu profonds, deviennent de plus en plus rares à mesure que le fond s'abaisse. On n'a jamais vu de ptéropodes au-dessous de 4 200 mètres, ce qui fait supposer que leur coquille se dissout dans les eaux abyssales. Elles manquent dans les fonds de mers polaires et dans les sédiments devenus couches géologiques.

La vase à ptéropodes s'étend entre 712 et 2788 mètres, dans

l'Atlantique, entre l'Amérique et l'Afrique, près des Antilles, des Açores et aux îles Fidji dans le Pacifique ; son aire totale est de 15 millions de kilomètres carrés. Sa teneur en calcaire est comprise entre 52 et 98 pour 100 et elle renferme environ 30 pour 100 de coquilles de ptéropodes mélangées à des dépouilles de foraminifères souvent recouvertes de manganèse. On y trouve de 2,41 à 2,44 pour 100 de phosphate de chaux ; après une attaque à l'acide, elle laisse 20 pour 100 de résidu insoluble. Elle se distingue de la vase à globigérines à laquelle elle passe d'ailleurs par degrés insensibles, par la présence caractéristique des dépouilles de ptéropodes et par une plus faible proportion de résidu insoluble.

Quelle que soit la nature d'un dépôt marin, son dernier terme de transformation est l'argile appelée habituellement argile rouge, désignation erronée parce que sa couleur est très variée, de sorte qu'il vaudrait mieux la nommer argile océanique ou abyssale. Elle est le dernier terme de la décomposition de toutes les matières organiques et minérales qui entrent dans la masse des eaux océniques. De transformation en transformation, tout concourt à sa création, troubles de fleuves, matériaux minéraux erratiques, plantes continentales, restes de plankton, de nekton, de benthos, poussières volcaniques, continentales et cosmiques. Sa couleur correspond à la diversité de sa composition ; bleue quand elle est riche en matières organiques, en sulfure de fer et en matières bitumineuses, grise quand elle contient plus de 20 à 25 pour 100 de calcaire, brune quand elle renferme beaucoup de manganèse comme l'argile du Pacifique, rouge lorsque le fer, cessant d'être réduit aux dépens de la matière organique complètement usée, a pu prendre son maximum d'oxydation au contact de l'oxygène dissous. L'argile atlantique affecte la dernière teinte. Son élément essentiel est l'argile pure, silicate d'alumine hydraté en particules infiniment ténues, amorphes et isotropes, incolore si elle est dépourvue de fer, ce qui n'arrive jamais au fond des mers, et d'autant plus rouge qu'elle renferme une proportion plus forte de ce métal peroxydé.

L'argile océanique est molle, plastique, d'un toucher gras ; cal-

cinée elle rougit fortement et lorsqu'on la traite par un acide dilué, c'est encore la couleur rouge qu'elle présente. On comprend que sa teneur en calcaire soit extrêmement variable : tantôt elle atteint jusqu'à 20 pour 100, tantôt elle n'est que de 1 à 2 pour 100; théoriquement elle ne devrait contenir aucune trace de calcaire. Lorsqu'on l'étudie avec soin au microscope avant de la passer à l'acide, on y trouve des restes de foraminifères pélagiques, plus rarement de foraminifères benthiques comme *Miliolina* et *Textularia*, des coccolithes, des rhabdolithes, des restes d'échinodermes, de mollusques, de poissons, de céphalopodes, rarement des ptéropodes et des coccosphères, des cristaux d'une zéolithe appelée phillipsite. Après action de l'acide, on y reconnaît des restes siliceux tels que des spicules d'éponges donnant une teneur moyenne de 2,4 pour 100 de silice, des grains de manganèse, des fragments ponceux et volcaniques, des feldspaths, de l'augite, de l'hornblende, de la magnétite, des esquilles vitreuses en grains dépassant rarement 0,05 millim. de diamètre, souvent décomposés et anguleux, enfin de la palagonite. Sa surface, sur le fond, est parsemée de gros nodules manganésiens, d'os tympaniques de cétacés et de dents de requins, les uns recouverts d'un enduit manganésien épais de 2 centimètres, à côté d'autres ne portant pas trace d'enduit, preuve de l'énorme lenteur de la déposition.

Le professeur J.-Y. Buchanan donne à l'argile rouge une origine un peu différente. Ayant remarqué que ces matières chauffées dans un tube fermé dégageaient toujours une odeur empyreumatique et une vapeur se condensant en un liquide alcalin, il admet que les êtres habitant le fond de la mer se nourrissent de la boue abyssale, la font tout entière passer à travers leur corps et s'assimilent leurs parties nutritives. La vase rejetée mélangée de matière organique vivante, réduit les sulfates de l'eau de mer en sulfures. Ceux-ci, en contact à leur tour avec l'oxyde ferrique de la vase, le réduisent en sulfure ferreux avec séparation de soufre donnant sa couleur bleuâtre à la vase non en contact avec l'eau. Ce soufre libre se reconnaît par le traitement de la vase au chloroforme. En arrivant enfin au contact de

l'eau contenant de l'oxygène libre, le sulfure ferreux s'oxyde et la portion superficielle de la couche de vase rougit. On remarquera toutefois que cette explication s'applique non à l'argile rouge en général, mais à la mince pellicule rouge qu'on trouve assez fréquemment à la surface des fonds marins vaseux.

On voit combien est variable la composition de l'argile abyssale ; elle passe par degrés insensibles à l'état de vase à globigérines, ou à radiolaires, ou à ptéropodes. Pour mieux dire, chacune de ces vases, quelle que soit sa nature, se transforme en argile. On comprend tout le vague de la désignation d'argile qui classe sous le même nom une formation couvrant 135 millions de kilomètres carrés et en fait le plus vaste des fonds marins. En réalité, on ignore où elle commence et où elle finit car, sauf dans les fonds sableux côtiers, l'argile existe plus ou moins abondante, plus ou moins avancée en oxydation, dans tous les fonds vaseux. Cette diversité est un des plus puissants motifs d'adopter une classification purement mécanique et chimique.

La même imprécision subsiste quant à la profondeur. On admet qu'elle se trouve entre 4 099 et 7 223 mètres. L'apparente précision de ces chiffres est regrettable ; elle est éminemment fausse, car elle tend à laisser croire que l'argile rouge présente une unité soit chimique, soit de texture qu'elle ne possède en rien. Quel océanographe oserait distinguer le sédiment recueilli à 4 099 mètres et celui qui aurait été recueilli au voisinage du premier, à une profondeur moindre de quelques mètres ? Rien n'est plus à craindre en science que la pseudo-précision.

On a cru devoir donner des indications sur le degré de ténacité de l'argile abyssale et affirmer que sa portion superficielle au fond de la mer est plus ou moins fluide, tandis que sa ténacité augmente rapidement à mesure qu'on pénètre dans l'épaisseur du dépôt. On a prétendu obtenir une mesure de cette ténacité en notant la profondeur où y aurait pénétré le tube du plomb de sonde et en donnant des chiffres. Là encore on est en présence d'une pseudo-précision. A-t-on eu le soin d'opérer en chargeant toujours également le plomb de sonde et en l'envoyant avec la même vitesse ?

Est-on sûr de sa parfaite perpendicularité ? Si l'on n'a pas agi ainsi, ce qui est le cas, que signifient les chiffres donnés ?

Si on consent à accepter toute cette imprécision dans la désignation d'un fond, faudra-t-il admettre la grande profondeur où il se trouverait toujours ? Au sud-est du Portugal, j'ai examiné des argiles à 26 pour 100 de calcaire, parfaitement homogènes, récoltées par 1 737 mètres seulement. L'argile océanique est l'accumulation des parties les plus fines entrées dans la mer, quelle que soit leur origine, se maintenant très longtemps en suspension à cause de leur finesse et ne descendant sur le sol que sur les aires océaniques au-dessus desquelles les eaux, grâce à l'absence de courants de surface et surtout de profondeur, les laissent descendre lentement et s'entasser. C'est leur extrême division non moins que le grand repos où sont plongées ces particules qui fait de ces argiles le siège de réactions chimiques encore mal connues et qui aboutissent à la création de minéraux tels que la phillipsite. Si les argiles se trouvent en général dans les grandes profondeurs, ce n'est pas à cause de la profondeur même, mais parce que les régions les moins agitées des océans se trouvent presque toujours le plus loin possible des terres, là où sont aussi, presque toujours les plus grandes profondeurs.

Marray s'est appuyé sur le fait de l'existence de l'argile au-dessous de 4 000 mètres et de l'extrême lenteur de sa déposition prouvée par la présence de dents de requins, les unes recouvertes d'un épais enduit manganésien, les autres sans enduit, pour supposer que vers 4 000 mètres, le calcaire est dissous, probablement par l'acide carbonique dissous lui-même dans l'eau en contact immédiat avec le sol. Il invoque encore, à l'appui de sa théorie, que la pluie de foraminifères venant de la surface devant être uniforme sur l'océan tout entier, doit tomber aussi bien sur les aires argileuses que partout ailleurs. Si donc le calcaire manque sur ces régions, c'est parce qu'il y a été dissous. Murray observe encore que près des îles volcaniques, déjà à 2 000 mètres, les espèces de foraminifères à coquille mince disparaissent dans les fonds et enfin que la vase à globigérines traitée à l'acide, laisse un résidu

offrant absolument l'aspect de l'argile rouge. Aucune de ces raisons n'échappe aux objections. Il n'est pas prouvé et il n'est pas probable que les foraminifères soient également distribués dans toute la masse des eaux océaniques, au-dessus de tous les points du lit marin ; dans l'Atlantique, en des régions non volcaniques, on trouve de véritables argiles bien avant 4 000 mètres, alors que dans le voisinage, à une plus grande profondeur, se rencontrent des dépôts riches en calcaire. Si les foraminifères passés à l'acide laissent un résidu d'argile rouge, il faut remarquer qu'il s'agit, non de coquilles vivantes qui, par le même traitement ne laissent absolument aucun dépôt, mais de coquilles mortes et poreuses qui, ainsi que je l'ai reconnu par une série d'analyses, jouissent, quelle que soit leur espèce, de la propriété de tous les corps poreux, même la ponce, de condenser à la surface de leurs pores, les grains fins d'argile en suspension dans les eaux ambiantes. Est-il possible, sans aucune preuve directe, d'admettre un dégagement continu d'acide carbonique sur toute l'aire recouverte par l'argile abyssale, aire évaluée par Murray lui-même aux trois cinquièmes de la surface totale des océans ? Comme dernière objection à la théorie de Murray, on répondra que malgré les nombreuses analyses des échantillons d'eaux de fond prises au-dessous de 4 000 mètres, souvent immédiatement au-dessus de fonds argileux, aucune preuve certaine n'a jamais été fournie soit de la présence d'un excès de carbonate de chaux à l'état de bicarbonate, soit d'un excès d'acide carbonique. Jusqu'à ce que des analyses précises en décident, il y a lieu de soutenir que l'hypothèse de la disparition du calcaire au delà de 4 000 mètres est erronée et que l'argile abyssale est le résultat d'un triage mécanique précédé et suivi d'une diagenèse très avancée des minéraux contenus, dans les régions de calme maximum des eaux sus-jacentes depuis le fond jusqu'à la surface.

La question de l'origine de la craie ancienne a vivement préoccupé les géologues. Sir Wyville Thomson, le premier, frappé de la ressemblance que présente la vase à globigérines avec la craie ancienne qui fourmille, elle aussi, de foraminifères faciles à isoler

par lévigation et à distinguer ensuite au microscope, a pensé que l'océan actuel se recouvrait d'une formation crétacée identique à celle qui se formait il y a des milliers d'années sur le sol de la mer crétacée. Je passe sous silence les conséquences capitales si nombreuses résultant de cette opinion et touchant à la similitude d'une foule de conditions extérieures de climat, de température, de profondeur, d'agitation ou de calme des eaux, et d'autres encore, à notre époque et à l'époque crétacée. L'hypothèse semble parfaitement admissible. On a objecté que les espèces de foraminifères anciennes et actuelles différaient. Il est vrai que la craie ancienne est particulièrement abondante en textulaires, mais dans nos mers, selon la région, il y a prédominance sur le fond de telle ou telle espèce particulière de foraminifères. On citerait comme exemple les vases à biloculines de l'océan Glacial Arctique remplaçant les vases à globigérines du reste de l'Atlantique. En outre, on a reconnu dans les dépôts actuels et dans la craie, dix-neuf genres identiques et entre autre la *Globigerina bulloides*. La craie ancienne, passée à l'acide, démontre par l'examen de son résidu minéral l'extrême calme des eaux au sein desquelles elle s'est déposée, tranquillité que vient corroborer l'étude des fossiles crétacés et en particulier de certains oursins observés par M. Janet, dont les plaques très délicates, détachées par la décomposition consécutive à la mort de l'animal, pendant que le sol était immergé, se retrouvent les unes à côté des autres dans la roche émergée et durcie. Les fonds actuels contiennent de la silice disséminée sous forme de spicules, de débris de radiolaires ou de diatomées ; dans la craie ancienne elle est groupée en rognons de silex distribués en bandes horizontales. C'est le résultat de phénomènes postérieurs à l'émersion des couches crétacées et dus au suintement d'eaux supérieures dissolvant le calcaire et la silice et permettant le groupement de cette dernière autour de centres d'attraction en bandes parallèles dont les caractéristiques, épaisseur et écartement, sont fonctions de la masse de silice distribuée dans la vase ancienne, à la vitesse de suintement de l'eau et à l'énergie des forces moléculaires. Le calcaire dissous, transporté par l'eau descendante et redéposé

ensuite, a donné la compacité et le degré d'induration que présente la craie et qui manque aux vases calcaires marines actuelles. Jusqu'à preuve du contraire — j'ajouterai preuves précises et rigoureuses et non preuves qu'on appellerait volontiers de sentiment du genre de celles qui ont été formulées par des géologues peu familiers avec l'océanographie, — je ne fais aucune difficulté à admettre une remarquable analogie générale entre la craie ancienne et les vases à globigérines actuelles.

CHAPITRE VI

LES SÉDIMENTS CHIMIQUES COSMIQUES, ÉOLIENS ET CORALLIENS

Certaines formations s'effectuent par voie chimique au fond de la mer. L'océanographie, à mesure qu'elle se développe, voit s'ouvrir de nouveaux et plus vastes horizons. On croit d'abord qu'il sera facile d'en embrasser l'ensemble et à peine s'est-on mis résolument au travail et a-t-on pénétré un peu plus dans le vif des diverses questions qu'elle traite, qu'on s'aperçoit de l'ambition de ses espérances. Chaque sujet se divise en branches distinctes, assez peu différentes au début, mais qui divergent toujours davantage les unes des autres et qui jettent à leur tour des rameaux ; de spécialité en spécialité, sans rien méconnaître des inconvénients graves de la spécialisation, le chercheur est, malgré lui, forcé lui aussi de se spécialiser. Il ne reste qu'une ressource. Le rôle du spécialiste consiste à connaître aussi complètement que possible, une région déterminée quelconque de la science, si petite qu'elle soit et à se servir des connaissances acquises à force de travail pour en résumer les lois, en extraire en quelque sorte la quintessence afin de la livrer, réduite à son expression la plus simple et par conséquent la plus compréhensible, aux autres spécialistes. Ceux-ci agissant de même, livreront en échange la quintessence de ce que leurs efforts dirigés vers un but restreint leur auront permis à eux aussi d'approfondir. Une science non susceptible d'être résumée, condensée à l'usage de tous, n'est pas une science. Il ne s'agit évidemment pas d'être informé des détails, ni même des faits qui ont

servi à établir les lois, mais de savoir nettement le but vers lequel on marche, les grands résultats déjà conquis et ceux qui restent à conquérir. Trouver les moyens d'y parvenir reste l'affaire du spécialiste ; chacun d'eux portant toute sa responsabilité doit être cru sur parole jusqu'à preuve formelle d'erreur. Telle se comprend l'œuvre de la science, collaboration d'autant plus indispensable que le domaine du savoir humain s'est si effroyablement agrandi que l'intelligence est maintenant incapable d'en embrasser autre chose qu'une infime partie. On a acquis la conviction que dans la nature, le moindre phénomène est la totalisation algébrique de l'ensemble de toutes les forces naturelles, objets de toutes les sciences, dont chacune, en chaque cas particulier, possède une valeur positive, négative ou nulle. Plus je regarde la nature, plus je vois grandir la complication et diminuer le hasard. Tout homme voulant se livrer à la science serait donc, quoi qu'il fasse, obligé de tout savoir, ce qui lui est matériellement impossible. Il est par conséquent forcé de passer par une éducation première complète embrassant à grands traits l'ensemble des connaissances humaines, sorte de culture générale préliminaire pour l'esprit qui devient alors apte à tout comprendre, suivie d'une spécialisation de plus en plus serrée, à mesure des progrès accomplis, avec obligation stricte de condenser pour l'usage d'autrui et à charge de revanche, les résultats obtenus, fruits de son labeur et de son expérience. Je ne parle pas des spécialisations hâtives ; la science en meurt et bien d'autres choses en même temps.

S'il fallait fournir une preuve, on la trouverait dans l'étude des sédiments chimiques. Parmi les sciences, on a pris la géologie ; puis, en géologie, on a restreint ses investigations à l'océanographie. Après l'avoir étudiée dans son ensemble et avoir constaté que son horizon s'élargissant, dépassait la portée de la vision intellectuelle d'un seul homme, on s'est à peu près cantonné dans le domaine de la lithologie sous-marine. Bientôt on a reconnu que c'était encore trop ; que l'intelligence, la puissance de travail et surtout, hélas ! le temps, étaient limités et il est devenu indispensable, sans dédaigner le reste, selon l'aptitude personnelle, les cir-

constances qui ont une part si considérable dans les décisions, d'opter pour l'une des trois branches, lithologie minérale, lithologie organique ou chimie du fond de la mer. Depuis la mort du regretté Konrad Natterer, cette dernière spécialité n'est guère représentée aujourd'hui ; c'est un terrain à peine aperçu qui devrait tenter une jeune ardeur scientifique en quête d'une voie. Que d'obscurités à éclaircir, que de mystères à dévoiler ! On connaît une multitude de faits ; ils demeurent isolés les uns des autres et non coordonnés en des lois simples qui évidemment existent, qui ne sont pas trouvées et dont la connaissance est impérieusement réclamée, car l'histoire du fond de la mer est celle des roches sédimentaires de la surface du globe que nous habitons.

Cette étude est évidemment compliquée ; quelle étude nouvelle ne l'est pas ? L'œuvre de la science consiste à débrouiller un chaos, à transformer en simplification une complication qui n'est jamais qu'apparente. Des minéraux prennent naissance sur le fond, calcaire, silicates comme le phillipsite, la chabasie, la glauconie, les phosphates ; il se fait des dolomitisations, des palagonitisations. Ces produits résultent des actions mutuelles des minéraux dissous, mais tous les corps, en abondance ou en petite quantité, se trouvent dans la mer puisqu'aucun n'est absolument insoluble. Leur quantité plus ou moins considérable par unité de volume du liquide n'est pas en question, étant donné le pouvoir de sélection et d'accumulation de certains éléments à l'égard de certains autres éléments, lois moléculaires à peine soupçonnées. On ignore à quel état les corps existent dans l'eau. L'analyse indique la somme totale brute de chaux, de magnésie, d'acide carbonique, d'acide sulfurique, mais toute la magnésie, par exemple, se trouve-t-elle en sulfate ou en carbonate ou partie en sulfate et partie en carbonate ? De même pour le reste. A supposer que l'on connaisse ces proportions dans une localité, elles ne sont évidemment pas les mêmes dans une autre localité, car on ne saurait trop le répéter, l'eau de mer n'est pas une solution plus ou moins étendue, dans de l'eau distillée, d'un mélange unique de sels, si complexe qu'il soit, mais toujours identique. Il importe de prendre en considération, comme

conditions non usuelles dans les laboratoires, le temps dont la durée est presque illimitée au fond de l'océan, à cause de la lenteur de la sédimentation et la pression s'exerçant dans les abîmes, énorme puisqu'elle est d'une atmosphère environ par 10 mètres de profondeur et en même temps nulle s'il s'agit de gaz, puisque ceux-ci, au fond, ne sont jamais qu'à la pression atmosphérique. La matière organique possède un immense rôle chimique, différent selon qu'elle est vivante ou morte, — pouvoir de sélection dont nous parlions tout à l'heure, grâce auquel telle ou telle plante accumule dans ses tissus, parce qu'elle vit, tel ou tel métal contenu parfois en proportion infinitésimale dans l'eau ambiante et, comme Mohr l'a établi dans sa belle théorie, effet du carbonate d'ammoniaque provenant de la décomposition de l'albumine des êtres ayant vécu et qui précipite le carbonate de chaux par réaction sur le sulfate de chaux dissous. Il y a encore à ajouter l'action des microbes dont on commence à peine à deviner la grandeur ou, pour mieux dire la toute-puissance sur la terre, tandis que, sauf son existence, on ignore à peu près tout sur elle au fond des mers. Un si vaste sujet, la certitude de si belles et si utiles découvertes ne tenteront-ils pas un jeune savant riche des années qui lui restent à consacrer au travail, riche de temps, ce trésor si précieux et si rapide à se dépenser quelque économe qu'on en soit.

Nous nous bornerons à présenter les faits principaux relatifs aux dépôts chimiques. Puisse cette énumération de ce qu'on sait montrer combien il reste à savoir.

L'eau de mer qui contient tant de sels divers est néanmoins très éloignée de son point de saturation. Avant de rien laisser déposer, elle doit être réduite à la moitié de son volume et la précipitation ne commence à devenir réellement abondante qu'au moment où elle a été réduite par évaporation au cinquième de son volume primitif. Les sels se déposent successivement. D'abord le fer seul, puis le carbonate de chaux seul, ensuite le sulfate et le carbonate de chaux mélangés, puis successivement le sulfate de chaux seul, le sulfate de chaux mélangé au chlorure de sodium, au sulfate de magnésie et au chlorure de magnésium. Enfin, le sulfate de chaux

étant entièrement précipité, il se déposera simultanément un mélange de chlorures de sodium et de magnésium, du sulfate de magnésie et du bromure de sodium. On comprend quelle variété en résultera pour les dépôts d'évaporation selon la nature de l'eau de mer et surtout selon la localité géographique, le climat chaud ou froid, sec ou humide. Cette question élucidée et simplifiée éclairerait le problème encore confus des formations salifères géologiques anciennes et même plusieurs phénomènes actuels comme celle de la concentration de l'eau de la Caspienne dans le golfe Kara-Boghaz.

Si l'on considère les dépôts formés sur le sol océanique, on se trouve dès le début en présence d'une question capitale. L'eau du fond a-t-elle la même composition que l'eau de la surface ? Le problème tout aussitôt se double. S'agit-il de l'eau immédiatement sus-jacente au sol ou de l'eau d'imbibition du fond, celle qui humecte la vase et dont les molécules tenant tant de sels en dissolution sont au contact d'une énorme prédominance de matériaux excessivement fins, augmentant l'énergie des phénomènes moléculaires, toujours fonction des surfaces et très variés puisque ces matériaux sont constitués par des minéraux à toutes les périodes de leur diagenèse. Chacune d'elles possède une composition particulière. Murray et Irvine qui ont établi ce résultat par l'analyse chimique en ont conclu qu'essayer, comme on ne l'a que trop fait, d'évaluer par un simple dosage du chlore les autres parties constituantes de l'eau de mer conduirait à des résultats complètement erronés. Cette variation de composition diffère avec la composition minéralogique du fond et, d'après des analyses exécutées dans mon laboratoire, sa tenenr si variable en matières organiques dosées sous forme d'ammoniaque. Il en est de même de l'eau immédiatement sus-jacente où tout varie selon la localité : densité, teneur en halogènes, en ammoniaque, en acide sulfurique. Or, ces deux eaux étant en contact, se diffusent l'une dans l'autre. C'est pourquoi j'ai été amené à supposer, du fond vers la surface, l'existence d'une circulation chimique s'effectuant par diffusion, dont on peut suivre la trace pour un espace de mer déterminé, au moyen

des variations de la densité normale, de l'halogénie, de la teneur en acide sulfurique et en ammoniaque, d'échantillons d'eaux recueillis en divers points de l'aire étudiée, en séries depuis le fond jusqu'à la surface.

L'action de la matière organique est particulièrement importante. Sous forme de carbonate d'ammoniaque, en présence du sulfate de chaux dissous dans l'eau, elle se transforme en sulfate d'ammoniaque avec précipitation de carbonate de chaux. En présence de phosphates alcalins, de phosphate de soude, par exemple, le carbonate de chaux, en quelque sorte à l'état naissant, sera susceptible par double décomposition, de donner naissance à du phosphate de chaux et à du carbonate de soude. Telle serait peut-être la genèse des nodules phosphatés du fond de la mer. Peut-être faudrait-il expliquer d'une façon analogue la précipitation simultanée de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie produisant de la dolomie. On a prétendu qu'à cause de la matière organique, il se faisait au sein de l'eau de mer une réduction des sulfates des alcalis et des terres alcalines, de sorte que l'alcalinité de l'eau de mer augmenterait sur le fond. Le fait, actuellement hypothétique, serait facile à prouver par des dosages comparatifs de l'alcalinité dans les profondeurs intermédiaires et contre le sol. Si il se vérifie, il se trouvera en opposition formelle avec l'hypothèse de la disparition du calcaire dans les profondeurs, attribuée à l'acidité de l'eau de mer par dissolution d'acide carbonique se dégageant du sol. En revanche, il expliquerait la richesse de la mer Noire en acide sulfhydrique, gaz résultant de ce que l'eau de cette mer contiendrait une quantité de fer et d'oxygène insuffisante pour se combiner au soufre des matières organiques décomposées et permettre à la peroxydation de s'effectuer. Il est vrai que, par contre, on a expliqué cet acide sulfhydrique par la présence d'un bacille particulier, *Bacillus hydrosulfuricus ponticus* et il en a été de même pour la formation de la dolomie. Aux points où il y aurait sur le fond grand excès de matières organiques, il y aurait plus particulièrement création de nodules phosphatés, de schistes bitumineux, même de pétrole. Le professeur Konrad Natterer, a

étudié ce mode de formation du pétrole dans des fonds provenant de la Méditerranée. On a aussi attribué le pétrole à ce que beaucoup d'êtres planktoniques ont le pouvoir, pour faciliter leur natation, de sécréter des gouttelettes d'huile couvrant leur corps comme un enduit. Tombés sur le sol après leur mort, leur graisse se mélange à la vase et, dans les anciennes couches géologiques, ce serait à la suite d'un échauffement subséquent, que ces matières grasses auraient été distillées et se seraient accumulées en donnant naissance au pétrole ou à tout le moins aux schistes bitumineux. Que de mystères à dévoiler, que de travaux à exécuter ! Et j'ai entendu se plaindre de ce que les sujets de thèses étaient rares ! Le dépôt chimique le plus important par son abondance au sein des mers est celui de la glauconie, silicate de fer hydraté contenant des quantités variables de potasse, de magnésie et d'alumine. Pour se former, il exige la présence de la matière organique ; il recouvre d'abord les parois intérieures des foraminifères morts descendus sur le fond ; peu à peu la cavité se remplit, l'enveloppe calcaire finit par éclater et tomber, le grain de glauconie continue à s'accroître et prend l'aspect de globule. On rencontrera donc tous les stades depuis le véritable sable glauconieux pur, la vase glauconieuse plus ou moins mélangée de grains, jusqu'à la vase profonde, quelle que soit sa nature, renfermant quelques grains éparpillés de glauconie.

Le type des sables glauconieux a été récolté par l'*Albatross* sur les côtes de Californie entre 180 et 550 mètres, en grains atteignant 1 millimètre de diamètre. Il en existe sur le banc des Agulhas, entre 180 et 270 mètres, en grains ronds, à surface lisse ou mamelonnée, mate ou brillante, de couleur noire ou vert foncé que parfois la glauconie, par cimentation de grains minéraux étrangers, transforme en nodules de plusieurs centimètres de diamètre, ainsi que dans le détroit de Torrès par 280 mètres et sur le rebord concave du Gulf-Stream. Les sables verts sont des dépôts de faible profondeur ; on n'en a jamais reconnu au-dessous de 1650 mètres.

La glauconie des vases est aisément reconnaissable à son aspect terreux, sa couleur vert olive qui, pour les grains d'un certain

volume, est tellement foncée qu'elle paraît noire. Au microscope, en lame mince, elle manifeste en lumière polarisée les phénomènes de polarisation d'agrégat, c'est-à-dire offre l'aspect d'un semis de points brillants s'éteignant successivement mais dont l'intensité lumineuse totale ne change pas par une rotation complète entre les nicols croisés. Elle résiste aux acides étendus de sorte qu'elle se concentre dans le résidu obtenu en traitant la vase par l'acide chlorhydrique étendu afin de la débarrasser du calcaire. Elle est toujours mêlée aux sédiments terrigènes sur les côtes rocheuses où ne débouche aucun grand fleuve ; elle exige une sédimentation lente, c'est-à-dire des eaux tranquilles. Selon Murray, la nature des roches ayant fourni les débris aurait une importance ; il faudrait des roches cristallines anciennes. Dans beaucoup de sables verts et de vases vertes, on distingue de petits corps brunâtres ou verts qui seraient des fragments de roches cristallines transformées en glauconie, laquelle, dans ces conditions, prendrait même quelquefois aussi l'état amorphe avec une couleur vert brunâtre. Elle est absente dans les grands fonds au centre des océans ; si on la rencontre quelquefois en grains dans les argiles rouges, elle y a été apportée par les courants. Elle manque également dans les vases et sables coralliens lorsque ces dépôts sont éloignés des continents, et au voisinage des volcans. Cependant, si les sédiments volcaniques sont à quelque distance de terre, on peut y trouver de la glauconie, preuve que la présence de ces minéraux particuliers n'est pas indispensable. Il en est de même des restes calcaires qui ne sont qu'une condition de la formation du minéral, puisque, dans une foule de points, même voisins des continents, on récolte des vases abondamment fournies de restes de foraminifères, quoique sans trace de glauconie. La glauconie manque également dans la vase rouge de la côte du Brésil et dans celle de la mer Jaune, probablement à cause de la peroxydation totale du fer qui y est contenu. En revanche, elle abonde sur la côte du Portugal, sur celle de l'Afrique occidentale, à l'est de celles de l'Amérique du Nord, en Méditerranée et au nord de l'Écosse. Les vases vertes glauconieuses ne commencent guère à apparaître que de 360 à 550 mètres

de profondeur et elles descendent jusqu'à 2 300 mètres. Leur teneur en calcaire, comprise entre 0 et 56 pour 100 diminue à mesure qu'augmentent la profondeur et la distance à la terre. Passées à l'acide, elles laissent de 44 à 100 pour 100 de résidu composé de débris minéraux, de grains phosphatés, compagnons presque constants et de restes siliceux de diatomées, radiolaires ou spongiaires constituant de 1 à 50 p. 100 du total du résidu.

Le traitement d'une vase verte à l'acide étendu renseigne sur la genèse de la glauconie. En effet si on agite dans un tube de verre le résidu avec un fort excès d'eau et qu'on abandonne au repos, le sédiment se partage en trois portions : des grains vert foncé, des grains vert clair et des moulages intérieurs de foraminifères blancs, gris clair, jaunes et brunâtres, stades successifs de la glauconitisation. Au microscope, les coquilles de foraminifères s'aperçoivent revêtues à l'intérieur d'un mince enduit brun rouge qui, en augmentant de volume et en prenant une couleur vert clair, puis vert foncé, finit par remplir la cavité et la fait même éclater. On a alors un véritable grain de glauconie. Jamais la glauconitisation ne commence par l'extérieur de la coquille; les moulages sont toujours intérieurs.

On a trouvé des grains de glauconie absolument semblables aux grains des mers actuelles dans tous les étages géologiques, depuis le cambrien jusqu'au tertiaire.

Pour faire en quelque sorte pendant à la glauconie, la mer crée la phillipsite, autre silicate qui est pour ainsi dire en tout l'opposé du premier. C'est une zéolithe, silicate d'alumine hydraté contenant du fer, de la potasse, de la soude, de la chaux et de la magnésie, attaquable par l'acide chlorhydrique en laissant un squelette de silice. La glauconie était amorphe ou tout au moins en agrégats cristallins; la phillipsite est toujours cristallisée en prismes de 0,03 mm. de longueur environ, à arêtes vives, recouverts d'un enduit jaunâtre, simples, isolés ou mâclés par six, ou bien encore en groupes irréguliers formant des sphérolithes. Un passage à l'acide très dilué les débarrasse de cet enduit. On trouve en abondance la phillipsite dans les argiles rouges. Le

Challenger, entre les îles Sandwich et celles de la Société, a ramassé des fonds dans la constitution desquels ce minéral entrait pour 20 à 30 pour 100; aussi couvre-t-il de vastes espaces dans le Pacifique central et dans l'océan Indien. Il est plus rare dans les vases à radiolaires et davantage encore dans les vases à globigérines. Tout au contraire de la glauconie, minéral de faible profondeur et du voisinage de terre, la phillipsite se trouve dans les grandes profondeurs des portions centrales des océans où elle est associée aux roches volcaniques récentes de la décomposition desquelles elle provient, au fond des mers, comme la phillipsite qu'on pourrait appeler continentale, se trouve dans les vacuoles des roches volcaniques récentes décomposées par l'eau qui suinte au travers et dans les briques des eaux thermales de Plombières où Daubrée a reconnu son existence.

Deux autres substances minérales se forment au sein des eaux marines, les nodules phosphatés et les nodules manganésiens et entre elles on retrouve un peu de l'opposition existant entre la glauconie et la phillipsite.

Les nodules phosphatés se rapprocheraient volontiers de la glauconie; ils sont abondants dans les vases vertes et existent dans les vases à globigérines qui, traitées par les acides afin de supprimer le calcaire des foraminifères, les laissent en résidu sous forme de petits grains pierreux. Parfois le phosphate de chaux constitue des nodules de 1 à 3 centimètres de diamètre, atteignant même 6 centimètres, de couleur brun sale, d'aspect inégal, percés de trous, mamelonnés ou anguleux, concrétions de minéraux divers cimentés par le phosphate de chaux, entre 180 et 3 430 mètres, au voisinage des côtes, surtout dans les parages où, par suite de la rencontre d'un courant chaud et d'un courant froid, les eaux sont soumises à des alternatives brusques de température auxquelles ne résistent pas les animaux marins. Ceux-ci meurent en foule et leurs dépouilles entassées sur le fond y apportent la matière animale et l'acide phosphorique indispensables à la production des nodules.

L'acide phosphorique peut être apporté par d'autres voies. Les anthozoaires des récifs coralliens contiennent en outre du calcaire

qui en constitue la masse principale, de la silice, du fluor et du phosphate de chaux, et Verill a montré qu'une source notable de phosphore provenait des excréments de poissons tombés sur le fond.

Enfin la dernière formation à étudier est celle des nodules manganésiens en grains mamelonnés, en nodules de 1 à 15 centimètres de diamètre, de couleur brun noirâtre très foncé et assez variés de forme pour que leur seul examen permette de reconnaître leur provenance. Buchanan en a trouvé par 190 mètres dans le Loch Fyne, près Glasgow, en petits grains. Les Américains en ont récolté entre 1800 et 3 000 mètres dans la région du Gulf-Stream où le sol est couvert de leurs concrétions en fragments de 2 à 15 centimètres qui atteignent quelquefois un poids de 10 kilogrammes. D'un seul coup de drague, dans le Pacifique, par 4 297 mètres, le *Challenger* en a rapporté 508 kilogrammes. C'est plutôt un produit de mer profonde où il se trouve à la surface du sol; il est abondant dans l'océan Pacifique et l'océan Indien; dans l'Atlantique, on ne le connaît qu'autour des îles volcaniques.

Les nodules manganésiens contiennent 70 pour 100 environ d'oxydes de fer et de manganèse hydratés par portions à peu près égales; le reste est constitué par un grand nombre de corps différents, parmi lesquels prédominent la silice et l'alumine. En outre, par un curieux pouvoir de sélection sur les corps dissous dans l'eau ambiante, on y a signalé la présence de corps très rares dans l'eau de mer, le zinc, le thallium, le titane, le nickel, le cobalt, le cuivre, le plomb et le molybdène. Le centre du rognon est toujours occupé par un débris d'origine organique ou minérale, un fragment de ponce ou d'obsidienne, par exemple, ayant servi de centre d'attraction. Le manganèse est aussi en enduit sur des pierres, des coquilles, du calcaire, des algues, des dents de requins, des os tympaniques de cétacés.

La genèse de nodules manganésiens a fait l'objet d'hypothèses diverses. On les a attribués à une action exercée par de la matière organique ou encore à des sources minérales sous-marines. Murray et Renard, remarquant leur abondance dans les régions volcani-

ques, ont pensé qu'ils résultaient d'une décomposition des matériaux détritiques rejetés par les volcans. Stanislas Meunier a reproduit synthétiquement les enduits manganésiens en faisant arriver sur du calcaire une solution manganésienne additionnée d'une faible proportion d'un sel ferreux. Enfin Dieulafait a pensé que le manganèse dissous à l'état de carbonate de protoxyde à la faveur d'un excès d'acide carbonique, se transformait au contact de l'air en bioxyde qui tombe sans cesse en pluie de la surface à travers les eaux océaniques. Sa proportion serait donc d'autant plus grande sur le sol que les autres débris tombés en même temps que lui seraient en plus petite quantité. Il lui a suffi de laisser au repos pendant un mois des bouteilles remplies d'eau de mer, de les vider et de promener à l'intérieur quelques centimètres cubes d'acide chlorhydrique, pour obtenir un liquide abandonnant par évaporation un produit ferrugineux exceptionnellement riche en manganèse. Le même savant, en employant des procédés d'analyse très délicats, a trouvé du manganèse dans tous les fonds marins examinés par lui. De ces hypothèses, quelques-unes sont contradictoires, d'autres ne s'excluent pas. Le plus probable est que l'origine n'est pas unique. Dans la plupart des discussions, le cas le plus fréquent est que personne n'a tout à fait tort et n'a tout à fait raison.

Il est d'autres concrétions sous-marines : la dolomie, par exemple, pourrait provenir de la réaction du carbonate d'ammoniaque sur un mélange de sulfates de chaux et de magnésie dissous, suivie d'une précipitation simultanée de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie. D'autres auteurs et en particulier Walther, ne seraient pas éloignés d'attribuer sa formation à l'action de bactéries spécifiques. On a bien trouvé, près de Ceylan, par 1 234 mètres, des concrétions calcaires contenant 75 pour 100 de sulfate de baryte. On ignore la cause de ces localisations de certains éléments au sein des eaux de la mer sur le lit océanique.

Les dépôts chimiques, quels qu'ils soient, se créent en échantillons isolés. Quand on trouve de grandes concrétions, elles résultent d'un englobement d'éléments minéraux quelconques par un

ciment formé par le dépôt chimique lui-même. Il suffit d'enfouir un morceau de fer dans le sable d'une plage mouillée par la mer pour obtenir de semblables conglomérats cimentés par l'oxyde de fer.

Les poussières contribuent au remplissage de l'océan; elles sont d'origine cosmique, volcanique et terrestre.

Les poussières cosmiques viennent des espaces planétaires; elles sont des météorites. Sur la terre comme au fond des mers, il existe de grosses et de petites météoriles; seulement, sur terre, les grosses seules sont visibles et pour apercevoir les fines, perdues au milieu des débris de tous genres qui couvrent le sol, il faut des circonstances exceptionnelles telles que la présence d'une couche de neige qui, de plus, permet de les recueillir. C'est ainsi qu'au Groenland, Nordenskjöld a pu récolter sur de la neige qu'il lui suffisait ensuite de laisser fondre et de filtrer, une poussière d'un minerai cobaltifère et nickelifère d'origine certainement météorique.

Dans les dépôts sous-marins, les poussières cosmiques se récoltent surtout loin des terres, au milieu des argiles rouges dont l'accumulation est très lente; elles sont de deux sortes, les sphérulites magnétiques et les chondres.

Les premières, attirables au barreau aimanté, ont environ 0,2 mm. de diamètre; elles sont souvent marquées d'une petite dépression ou cupule. Solubles avec difficulté dans l'acide chlorhydrique, elles sont constituées par une croûte noire enveloppant un noyau métallique. Cette croûte résulte de la vive oxydation subie par le noyau métallique dont la surface s'est fondue et oxydée en traversant avec une grande vitesse l'atmosphère terrestre. La cupule est l'indice de la contraction par refroidissement effectuée après la chute. Le noyau en fer métallique avec cobalt et nickel est malléable. En écrasant le globule dans un mortier, la croûte éclate, le noyau apparaît plus ou moins aplati par la pression du pilon et, pour en reconnaître la nature métallique, il suffit de le mouiller d'une goutte de sulfate de cuivre dissous dans l'eau. Il se recouvre immédiatement d'une couche brillante de cuivre

métallique. Parfois le noyau a entièrement disparu et il ne reste qu'un fragment d'une enveloppe oxydée qui souvent même s'est fondue et a pris la forme d'une petite bouteille sphérique avec goulot présentant une surface lisse ou rugueuse, plus ou moins mamelonnée. On trouve fréquemment des globules cosmiques dans des groupements de cristaux de phillipsite et dans l'intérieur de nodules manganésiens.

Les chondres, d'environ 0,5 mm. de diamètre, offrent l'aspect de grains grossièrement sphériques, brunâtres, à éclat bronzé et à structure lamellaire. Ils sont insolubles dans l'acide chlorhydrique et contiennent de la silice, de la magnésie et du fer. Une lamelle examinée au microscope montre sur un fond blanc transparent, des séries d'inclusions brun foncé disposées en lignes parallèles. Les chondres ne se trouvent ni dans les roches éruptives, ni dans aucune roche terrestre, on ne peut donc leur attribuer qu'une origine cosmique. Au fond de la mer, ils se rencontrent dans les argiles rouges, c'est-à-dire loin des terres, associés à des nodules manganésiens, mais non inclus dans ces nodules, à des dents de requins, à des os de cétacés, à des lapilli altérés et à des cristaux de phillipsite.

Les poussières volcaniques proviennent des volcans. Éparpillées dans l'atmosphère sur une immense étendue au moment de l'éruption, elles retombent ensuite sur le lit océanique. La dispersion se fait d'autant mieux que la plupart des volcans sont distribués sur le bord de la mer. Les cendres de l'éruption du Tambora à Sumbawa (11 avril 1815) dont le volume a été évalué à 318 kilomètres cubes, ont été portées à Amboine à une distance de 1 900 kilomètres; celles du Krakatau, le 28 août 1883, ont couvert une aire de 1 000 kilomètres de rayon, équivalant à 32 fois la surface des Pays-Bas. Les parties les plus fines soutenues par la couche d'air adhérente qui fait corps avec elles, les suit dans leurs mouvements et les allège, se sont élevées à une hauteur de 50 kilomètres et sont restées plusieurs mois en l'air. Oxydées par les vapeurs aqueuses si abondantes pendant l'éruption, elles rougissent et l'on explique ainsi la vive coloration que présenta le ciel au coucher

du soleil pendant les quelques jours qui suivirent immédiatement l'éruption.

Les poussières volcaniques éoliennes sont composées de quartz, de mica, d'amphibole, de pyroxène, mais surtout de ponces et d'obsidiennes en grains très fins, arrondis, elliptiques, aplatis, irréguliers, vert foncé ou brun rougeâtre quelquefois gris, jaunâtres, isotropes. Les ponces et les obsidiennes dont l'origine peut être aussi sous-marine, s'attaquent au fond de l'eau et se transforment en palagonite.

Les poussières terrestres sont surtout abondantes sous le vent des déserts, comme à l'ouest du Sahara où elles sont poussées à la mer par le vent d'Est. Cette poussière qui contient des grains de quartz très petits est surtout constituée par de la latérite qui lui donne sa couleur rouge caractéristique. La latérite est en quelque sorte l'argile rouge continentale; c'est le résidu final de décomposition des roches ferrugineuses attaquées par les agents atmosphériques. Les poussières du Sahara s'éloignent jusqu'à 2 000 kilomètres de la côte : leur aire de dispersion commence un peu au sud du détroit de Gibraltar jusqu'à mi-chemin environ de l'Amérique, pour se continuer au sud, limitée par une ligne parallèle à la côte septentrionale du golfe de Guinée. On retrouve le même phénomène sur la côte nord du golfe Persique, le long de celle des Somalis près du cap Guardafui, enfin dans la mer Jaune, sous le vent du grand désert de Gobi. Les poussières s'élèvent à une extrême hauteur : on les a vues former des colonnes hautes de 600 à 1 000 mètres, ce qui explique l'énorme distance à laquelle elles sont entraînées.

La magnétite qu'on trouve dans les échantillons du sol sous-marin en faisant agir le barreau aimanté sur le résidu obtenu après attaque de l'échantillon par l'acide chlorhydrique étendu, n'a pas qu'une seule provenance. On sait qu'une partie est d'origine cosmique ou plus exactement est produite par l'oxydation à travers l'atmosphère des poussières cosmiques. Une autre portion résulte de la désagrégation des roches aussi bien volcaniques modernes que cristallines. On en trouve pour ainsi dire partout. La magnétite est à son maximum d'oxydation et par conséquent de stabilité

chimique; elle est en fragments très petits et sa densité élevée lui communique une remarquable puissance de résistance à toute destruction physique, chimique ou mécanique. Beaucoup de ces grains noirs sont en réalité non pas de la magnétite, mais de l'ilménite ou fer titané, du fer chromé et surtout de la fayalite dont toutes les propriétés sont les mêmes que celles de la magnétite, à cette seule exception près qu'elle laisse un squelette blanc de silice quand on l'attaque par un acide comme l'acide azotique ou même l'acide chlorhydrique chaud. La fayalite est un péridot sursaturé de fer, cet excès étant représenté par de la magnétite déposée en petits grains dans la masse même du minéral.

Nous avons appuyé à de nombreuses reprises sur l'énoncé de la loi suivante : un phénomène naturel est la résultante complexe d'une foule d'influences diverses dont les actions se totalisent. Dans chaque cas particulier, l'intensité de chaque action considérée individuellement est susceptible de varier entre des limites très étendues sans que leur total qui est le phénomène lui-même perde le caractère général qui le distingue, de sorte que les détails seuls en sont modifiés. On se trouve en présence d'une véritable addition algébrique à un nombre de termes, sinon infini, du moins très considérable, positifs, nuls ou négatifs, selon les circonstances. Devant cette multiplicité des termes, la science ne peut que se borner à disséquer en quelque sorte une série de phénomènes analogues, afin de se rendre compte dans chaque cas, de l'influence exercée par tel ou tel terme d'importance primordiale de l'addition algébrique. Elle perfectionne ensuite la connaissance obtenue en procédant par voie synthétique expérimentale, en suivant les variations d'une variable unique après que les autres auront été rendues artificiellement constantes. Alors seulement elle se trouve en état non de prévoir, mais d'expliquer. Quand, par exemple, le météorologiste aura étudié séparément l'influence de la température, de la pression barométrique, de la vapeur d'eau, de la nébulosité, de l'altitude, de la disposition géographique des lieux et de tous les autres éléments du climat d'une localité déterminée, il ne

sera pas devenu plus capable de prévoir en complète sûreté le temps du lendemain. Si, pratiquement, il a besoin d'un tel renseignement, il devra se résoudre à observer pendant de longues années, au même endroit et à établir des moyennes, ce qui lui fournira, non des assurances, mais des probabilités, ou bien, faisant appel à une méthode empirique, il organisera un service télégraphique qui l'avertira suffisamment à l'avance de l'approche d'un météore de trajectoire habituelle connue. Au point de vue scientifique strict, toute sa science ne lui aura permis que d'expliquer les événements après qu'ils se seront accomplis.

Les îles de corail fournissent un nouvel exemple bien fait pour rabattre l'orgueil humain si prompt à s'exciter lorsqu'il s'agit de science. Aucun sujet n'est plus simple et en même temps aucun n'est plus compliqué de sorte que les principes étant établis, les conséquences qui en découlent et qui sont des combinaisons diverses de ces principes, sont tellement nombreuses que la seule loi finale à laquelle on est amené, permettant de tout condenser en une formule unique est qu'il n'y a pas de loi. Toutes les explications qui auraient été données, — explications raisonnables, bien entendu, — étaient excellentes à cette seule condition de n'être pas exclusives. Chacun a raison pourvu qu'il consente à ne pas vouloir avoir toujours raison et à soi tout seul.

Les espèces coralligènes se divisent en polypes, hydraires et bryozoaires. Les coraux sont des cœlentérés, animaux constitués par un sac muni d'une ouverture unique entourée de tentacules et sécrétant un squelette calcaire. Ils se reproduisent au moyen de larves mobiles qui se fixent sur un support quelconque que désormais elles ne quittent plus et par bourgeonnement de sorte que le squelette sécrété par chaque individu fait corps avec les squelettes de ses voisins. L'ensemble appelé polypier forme une masse calcaire plus ou moins massive ou rameuse qui persiste après la mort de chaque individu, sur laquelle de nouveaux individus viennent sans cesse se fixer et qui par conséquent, s'augmente indéfiniment. Sa composition chimique est de 95 à 98 pour 100 de carbonate de chaux, 0,3 à 0,8 pour 100 d'acide phosphorique, de silice, magnésie,

fluor, oxyde de fer. Certaines espèces contiennent même de l'argent, du cuivre ou du plomb. Le carbonate de chaux s'y trouve à l'état d'aragonite, variété beaucoup moins résistante que la calcite à l'action dissolvante de l'eau de mer.

Les hydraires, genre auquel appartiennent les millépores, ont un squelette dépourvu de cloisons internes. Les bryozoaires sont de petits organismes vivant en colonies, sécrétant un squelette, mais ayant deux ouvertures distinctes à leur cavité stomacale. On les trouve à toutes les profondeurs; on en a récolté à 5 714 mètres; leur dispersion géographique est assez irrégulière et, à l'exception des récifs de la Floride, les régions abondantes en coraux sont au contraire pauvres en bryozoaires.

Les coraux se divisent en deux grandes catégories, les coraux isolés et les coraux groupés. Les premiers ont une aire de dispersion considérable et vivent dans les mers chaudes aussi bien que dans les mers froides, depuis la surface jusque dans les plus grandes profondeurs; on en a en effet trouvé par 5 500 mètres.

Les espèces coralligènes les plus importantes sont les porites, les madrépores, les astrœidés et les méandrines. Leurs conditions de vie sont rigoureusement déterminées, bien que quelques espèces, soient plus délicates que les autres, les plus rustiques étant les Porites après eux les madrépores et en dernier lieu les astrœidés et les fungiés. C'est pourquoi chaque région corallienne manifeste un facies spécial dû à la prédominance de telle ou telle espèce, selon la stabilité plus ou moins grande des conditions ambiantes. La plupart des coraux aiment la lumière et manifestent même de l'héliotropisme ; d'autres, plus rares, préfèrent l'ombre.

Les conditions de vie des espèces corralliennes sont les suivantes; elles sont absolument rigoureuses et toute la théorie des formations coralliennes en découle. Aucun exemple n'est plus capable de montrer toute la simplicité future de la géologie lorsque, dans un avenir prochain, suivant l'évolution fatale des sciences qui se précisent de plus en plus, elle sera enfin débarrassée des vaines dissertations, qui en auront si longtemps arrêté les progrès.

1° La température de l'eau ambiante ne doit jamais s'abaisser

au-dessous de 20 degrés ; elle doit en outre être très régulière car ses variations, même sans abaissement au-dessous de 20 degrés, sont funestes à la plupart des coralligènes.

2° La profondeur où vivent normalement les coraux ne dépasse pas 40 mètres. Certains vont encore jusqu'à 50 et même 90 mètres, mais ils se trouvent dans des conditions défavorables et sont devenus incapables de s'associer. Cette condition se rapporte peut-être à la pénétration de la lumière au sein des eaux, peut-être aussi au mouvement, si rapidement atténué en profondeur, des vagues qui n'apportent plus alors aux animaux une alimentation suffisante. Il est douteux que la quantité d'air dissous joue un rôle. Mais si les causes, là encore, sont à étudier de manière à en posséder une notion plus exacte, ce qui est la tâche d'un naturaliste physicien, leur ensemble est parfaitement établi, — pas au-dessous de 40 mètres.

Grâce à la faculté que possèdent beaucoup d'espèces de sécréter un mucus qui leur permet de demeurer humides, les coraux peuvent demeurer à l'air pendant l'intervalle de deux marées. Mais ils ne peuvent supporter une plus longue sécheresse et c'est pourquoi leur limite supérieure d'habitat s'arrête à la zone où s'exerce le jeu régulier des marées.

3° L'eau ambiante doit être salée et parfaitement limpide. Toute atténuation de la salure de l'eau et tout mélange de vase, de troubles, est une cause de mort immédiate. On a supposé que la turbidité de l'eau ne nuisait pas directement aux coraux, mais indirectement en supprimant le plantkon qui leur sert de nourriture. Dans ce cas encore il est à souhaiter qu'une étude directe indique par deux chiffres, résultats d'expériences, les salures maximum et minimum ainsi que le poids maximum de sédiments par litre d'eau, tolérés par l'animal.

Ces conditions sont indispensables. Partout où elles coexistent toutes trois ensemble, bien entendu puisque chacune d'elles est indispensable, des coraux pourront vivre. Inversement partout où une seule d'entre elles sera absente, aucun corail ne vivra. Cependant, parmi les espèces coralliennes, chaque variété, entre des

limites définies, offre une facilité d'adaptation plus ou moins grande, ce qui explique la prédominance ou l'absence de certaines espèces dans certaines régions, selon que les conditions générales sont très favorables, moyennement favorables ou médiocrement favorables.

La condition de température des eaux, à elle seule, cantonne le corail dans la zone tropicale ou sub-tropicale. C'est ainsi qu'on trouve les îles de corail dans le Pacifique dont toutes les îles sont pour ainsi dire coralliennes, dans l'océan Indien qui baigne les Laquedives, les Maldives, Maurice, la Réunion, les Seychelles, enfin dans l'Atlantique, au Brésil, au détroit de la Floride et aux Bermudes.

Comme toujours, on a établi pour les récifs coralliens une classification qui en vaut une autre.

Tout d'abord, deux catégories distinctes : les récifs coralliens qui sont adjacents à la terre et se divisent en récifs frangeants quand ils touchent la terre et en récifs barrières lorsqu'ils en sont éloignés d'une distance qui peut atteindre 80 à 100 kilomètres comme pour la Grande-Barrière située en avant de la côtè N.-E. d'Australie.

Les îles coralliennes ou atolls sont isolées au milieu de l'océan.

Darwin a le premier émis une théorie des récifs coralliens qui a été longtemps admise dans la science. Elle a été aujourd'hui singulièrement non pas détruite mais étendue. Darwin n'avait pas tort, mais il n'avait pas seul raison, peut-être même était-il, de tous, celui qui avait le moins souvent raison. Sa théorie, soutenue ensuite par Dana, présente une importance historique et comme, loin d'être fausse, elle est seulement insuffisante, il importe de la faire connaître.

Un atoll, pour prendre le type le plus complet, le plus pur d'une formation corallienne, a la forme d'un anneau de roche calcaire corallienne caverneuse plus ou moins couvert de végétation s'élevant de quelques mètres à peine au-dessus de l'eau. Il entoure une lagune intérieure communiquant plus ou moins avec la mer extérieure et est entouré lui-même presque toujours par une plage de sable calcaire fin doucement inclinée, et ensuite par une plateforme ne dépassant pas le niveau des eaux et qui, à une certaine

distance, descend par une pente assez abrupte d'au moins 10 degrés susceptible d'atteindre jusqu'à 63 degrés. Quelquefois, à la place de la lagune centrale ou lagon, se dresse un pâté de montagne ou un simple pic, de nature volcanique, auquel est contiguë la bordure corallienne, à moins qu'entre la montagne et l'anneau ne s'étende une lagune également annulaire.

D'après Darwin — et en cela il se montre excessif — tout récif corallien implique une subsidence du sol et par conséquent une manifestation d'un phénomène touchant à la dynamique interne du globe. Supposons qu'un pic montagneux s'élève au milieu de l'océan ; des larves de corail libres nageuses y abordent ; elles s'y fixent, constituent un polypier qui, les trois conditions de température, de profondeur et de limpidité étant favorables, va augmenter et finir par entourer le pic d'une ceinture continue. Le récif est frangeant. Admettons maintenant que la montagne éprouve un mouvement de subsidence. Le corail au-dessous de 40 mètres de profondeur cessera de croître mais le polypier demeurera comme une base solide sur laquelle, au-dessus de 40 mètres et jusqu'à la surface des eaux, les polypes continueront à vivre particulièrement du côté de la haute mer parce que là se fera l'apport maximum de nourriture poussée par la vague. La portion adjacente à la terre cessera de croître parce que la plate-forme s'étant élargie, les polypes s'y trouveront dans des conditions de vie moins favorables qu'à l'extérieur. Il en résultera une lagune annulaire et on aura un récif barrière. L'enfoncement se continuant, la bordure solide augmentera encore de diamètre et le lagon de largeur tandis qu'au contraire le pic central diminuera de tour et de hauteur. Il finira par disparaître et l'atoll prendra sa forme typique. On comprend combien sont étroites les relations entre les formations coralliennes et les formations volcaniques, de telle sorte que les îles purement volcaniques comme par exemple Saint-Paul et Amsterdam, auraient des chances d'être coralliennes si elles se trouvaient à une latitude moins basse.

Cette théorie a été longtemps admise dans la science. Depuis ces dernières années, un grand nombre d'observateurs ont été

examiner les atolls dans le monde entier et ont fortement étendu la conception de Darwin et de Dana qui n'avaient d'ailleurs observé que quelques-unes de ces formations. L'un d'eux s'est particulièrement signalé par ses voyages qu'il a résumés avec une extrême précision dans de magnifiques publications accompagnées d'une telle quantité de cartes et de photographies que toutes les pièces du procès sont en quelque sorte mises sous les yeux du lecteur qui n'aurait pas beaucoup à faire pour se persuader qu'il a lui-même réellement vu des îles coralliennes. Il s'agit du Prof. A. Agassiz, du Musée de Zoologie comparée de Cambridge aux États-Unis, qui a étudié sur place les formations coralliennes du détroit de la Floride, des îles Sandwich et des îles Fidji et qui enfin a suivi la campagne de l'*Albatross* qui, du mois d'août 1899 à mars 1900, s'est rendu de San-Francisco au Japon en explorant successivement les Marquises, les Paumotu, les îles de la Société, de Cook, des Amis, Fidji, Ellice, Gilbert, Marshall, Carolines et Mariannes.

On sait maintenant que loin d'être restreintes à des aires d'affaissement, les formations coralliennes correspondent bien plus fréquemment à des aires de soulèvement. On a constaté par des sondages exécutés sur divers atolls et en particulier à celui de Funafuti, dans les îles Salomon, que souvent elles sont déposées à la surface de calcaires stratifiés fossilifères ; d'autres fois on a reconnu l'existence de hautes falaises calcaires avec marques d'érosion par la mer, étagées les unes au-dessus des autres. On a donc été obligé, pour rendre compte des circonstances observées, de donner plus d'ampleur à la théorie.

Partout où les trois conditions de température, de profondeur et de limpidité seront réalisées, se formera un récif corallien. Si par soulèvement volcanique, ce qui est le cas le plus général, entassement de sédiments apportés par les courants ou pour toute autre cause quelle qu'elle soit, existe ou se crée un haut-fond à moins de 40 mètres de la surface, une larve de corail y abordera, se fixera et se développera jusqu'à ce que la masse des polypiers atteigne le niveau de l'eau. Elle s'arrêtera alors puisque les animaux ne peuvent supporter le contact de l'air pendant un intervalle plus

considérable que celui d'une marée. Dès ce moment, l'île prendra une forme et un développement fonction d'un nombre multiple de variables : vent, vagues, courants, solubilité du calcaire dans l'eau, porosité de la masse calcaire, végétation et d'autres encore.

Là, par exemple, où déferleront les vagues, elles apporteront un excès de nourriture ; se renouvelant sans cesse, elles permettront aux polypes d'assimiler plus aisément le carbonate de chaux qu'elles contiennent. Les coraux prospéreront donc surtout du côté où les vagues seront particulièrement violentes. Mais alors elles ne manqueront pas de détacher des blocs de polypier et de les pousser en avant. Ainsi s'édifiera lentement la plage, puis la levée annulaire. Qu'une noix de coco portée par les courants marins y aborde, que des oiseaux de mer sur leurs pattes ou sur leurs plumes y apportent des semences et aussitôt, sous l'influence du climat enchanteur de ces régions, la partie émergée se couvrira de végétation. Du côté protégé, les vagues seront moins puissantes, l'accroissement des coraux sera plus lent et ainsi apparaîtra le premier rudiment du lagon.

Le vent chasse les vagues. S'il souffle d'une manière régulière pendant un temps déterminé, il règlera la direction des vagues et les conséquences qui en résultent. L'anneau prendra une forme irrégulière. Là ne se borne pas l'action du vent. En passant sur la portion sèche de l'îlot et d'abord sur la plate-forme antérieure, il accumule les débris sableux, donne naissance à des plages de sable, parfois même à des dunes quelquefois assez hautes pour se mettre en marche et tuer la végétation sur certains points. Quand le vent devient cyclone, on se figure les effroyables ravages exercés sur ces îles dont l'élévation au-dessus de la mer est au plus de 25 mètres, souvent 5 ou 6 mètres seulement. Arbres, habitations, tout est balayé et la population pour laquelle n'existe absolument aucun refuge est anéantie. Si le vent, plus modéré, se borne à chasser des grains de sable calcaires, la lagune se comblera soit sur toute son étendue si elle est petite, ou seulement d'un côté si elle est vaste.

La solubilité du calcaire joue un double rôle : d'une part l'île

est usée par dissolution dans les eaux météoriques, d'autre part, cette eau douce chargée de calcaire ne retourne pas toute à la mer. Une portion imbibe la roche et soit par évaporation, soit par dépôt chimique de carbonate de chaux, contribue à rendre plus massif le calcaire plus ou moins caverneux constituant la masse de l'île. On voit l'effet du régime pluvial. Favorisant la végétation, il augmentera grâce à celle-ci la solidité de ce qu'on pourrait appeler la croûte de l'île ; il permettra à l'homme en le fournissant d'eau potable, de l'habiter ou bien il lui en interdira le séjour. En ruisselant, l'eau des pluies entraînera dans la lagune des sédiments qui la combleront. Le relief de l'île communiquera des directions déterminées au ruissellement. Ainsi se creuseront des ravins souvent assez profonds et, une fois parvenus à la mer, les ruisseaux toujours chargés de troubles, arrêteront le développement des coraux et pratiqueront dans la barrière des coupures qui serviront comme autant de portes d'entrée aux navires pour pénétrer dans la lagune ou, dans le cas de récifs frangeants, pour aborder la terre. A la Nouvelle-Calédonie, la capitale Nouméa, se trouve en face d'une de ces ouvertures. Sur les petites îles, s'il existe un village, il ne manque jamais de s'élever dans une situation analogue imposée par la facilité donnée aux embarcations de prendre la haute mer ou de se mettre à l'abri contre la terre.

La porosité du massif corallien où l'on trouve de véritables cavernes, est importante. Elle est ordinairement suffisante pour permettre une communication souterraine constante entre la mer et le lagon. La porosité, la dimension et le nombre des coupures existant à travers l'atoll, la direction et la force du vent se combinent pour amener dans la lagune une quantité variable d'eau et il en résulte des courants plus ou moins violents de l'intérieur vers la haute mer du côté sous le vent ou de la mer vers l'intérieur du côté au vent qui rendront facile, difficile ou même impossible, selon les circonstances, le passage des bâtiments par les coupures, c'est-à-dire les relations entre l'île et le dehors.

L'eau pluviale chargée d'acide carbonique dissout le calcaire ; en imbibant la masse sous-jacente, elle laisse redéposer le carbo-

nate de chaux et produit une cimentation ainsi que des stalactites très fréquentes dans les cavernes.

La compactisation du calcaire s'effectue aussi sous les eaux. Les polypiers sont plus ou moins branchus et irréguliers et leur amas n'est pas sans offrir quelque ressemblance avec un énorme fagot de branchages. Leurs interstices sont en partie comblés par les débris des portions supérieures brisées par les vagues ou par le roulement des galets. Les cavités sont habitées par toute une forme d'animaux supérieurs comme les poissons et surtout d'animaux inférieurs à coquille. Walther prétend qu'en secouant un fragment de polypier, on met au jour un véritable musée zoologique. Ces débris incohérents comblent encore les vides et seront ensuite cimentés par le travail des algues nullipores ainsi que par la réaction chimique connue s'effectuant entre le carbonate d'ammoniaque si abondant au sein des eaux toutes fourmillantes de vie et le sulfate de chaux dissous. Sur les plages qui pourtant à cause de leur blancheur éblouissante absorbent aussi peu que possible la chaleur, le durcissement a surtout lieu par évaporation.

Nous n'avons parlé que des principales variables qui font les îles de corail ; il en est bien d'autres et en particulier la rapidité d'accroissement du polypier, donnée que l'on a essayé de mesurer sans grand espoir de réussir jamais à résoudre ce problème si compliqué. La distribution sur le sol océanique, dans les parages situés en aval des courants venant des îles coralliennes, des particules fines enlevées à l'île qu'on distingue sous forme de traînées laiteuses se mélangeant lentement aux eaux environnantes et qui se déposent parfois très loin, modifie les fonds marins. Il serait sans utilité d'en citer davantage et de confirmer par une preuve de plus la loi naturelle tant de fois énoncée du concours de mille actions diverses pour constituer un phénomène déterminé. Aucun exemple n'était mieux fait pour la démontrer que l'étude des formations coralliennes. Rien que par ce qui en a été dit, on voit qu'en appréciant dans chaque cas la part de chaque action, on s'explique l'infinie variété de forme, de disposition, de phénomènes quels qu'ils soient dont une île de corail est le théâtre.

CHAPITRE VII

LA DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS L'OCÉAN

La température a été certainement une des premières particularités des eaux océaniques qui aient été constatées par cette raison qu'elle a dû l'être involontairement. L'humanité a pris de bonne heure des bains de mer, volontaires ou involontaires, et quiconque est entré dans l'eau a su observer sans étude préalable, très empiriquement, mais immédiatement si cette eau était froide ou chaude. Quant à étudier d'une manière régulière et précise la répartition de la température dans les eaux marines, il fallut fort longtemps. La nécessité pratique de cette recherche n'était rien moins qu'évidente et, de plus, on manquait de l'outil d'investigation. Sans hache, point d'arbre abattu, sans marteau, point de forgeron, sans thermomètre point de données systématiques sur la température. Jusqu'à la découverte de cet instrument, vers la fin du XVIIe siècle, rien ne fut fait et ne pouvait être fait. Aristote, qu'aucun problème n'arrêtait parce que se bornant à raisonner, il n'avait besoin d'autre outil que de son imagination qu'il portait toujours avec lui prête à fonctionner sur n'importe quel sujet, n'hésita pas à formuler son opinion. Il déclara que les eaux superficielles de la mer étaient plus chaudes que les eaux profondes et, par un hasard heureux, cette fois, il eut raison.

Lorsque le thermomètre fut inventé, à la fin du XVIIe siècle, et pour cela, il avait fallu vingt siècles depuis Aristote, l'outil était créé, la découverte de la vérité ne demandait plus que de la patience et du temps. On était assuré d'y parvenir car la patience et le temps sont denrées courantes parmi les hommes et le premier

pas, le plus difficile de tous, étant accompli, la marche en avant, lente ou rapide, est ininterrompue.

Le premier qui eut l'idée d'étudier systématiquement la distribution de la température dans la mer est Marsigli, cet aventurier de génie, véritable bohême de la science. Il se servit d'un thermomètre scellé, à index mobile poussé par le liquide dilatable, dont il donne le dessin dans son *Histoire physique de la mer*, quoique faute de description, nous ignorions quel était le liquide qui le remplissait ainsi que sa graduation. Jusqu'à 120 brasses de profondeur, dans la mer, il marquait la température sensiblement constante de 10,5 ou 10,75 degrés. Or on sait aujourd'hui que la température constante de la Méditerranée où opérait Marsigli est de 12,7 degrés centigrades à partir de 200 mètres environ. Nous ignorons aussi comment il parvenait à surmonter les diverses difficultés que présente la mesure d'une température profonde. Quoi qu'il en soit, devant Cassis où il exécuta la plus grande partie de ses études océanographiques, il envoya son thermomètre dans la profondeur à diverses distances de la surface, en nota les indications et après une seule série d'observations découvrit une loi des plus intéressantes relative à la répartition de la température dans la mer. En Méditerranée, au-dessous d'une épaisseur d'eau relativement faible soumise aux effets de la température de l'air et par conséquent à des variations, la température de l'eau demeure invariable, quelle que soit la profondeur. Ces mesures datent de décembre 1706. Marsigli est donc bien en avance sur tous les autres savants qui se sont occupés de ces études, de sorte qu'en thermométrie comme dans presque toute l'océanographie, ce fut encore la France qui ouvrit la voie. Marsigli bien qu'Italien de naissance puisqu'il était né à Bologne, eut cette étrange destinée d'avoir une nationalité différente suivant les divers métiers ou professions qu'il exerça et Dieu sait s'ils furent nombreux. Quand il fut général, il était autrichien, lorsqu'il fut jardinier-esclave, il était turc, mais il fut bien français tout le temps qu'il demeura océanographe. Membre de l'Académie des Sciences de Paris, c'est aux frais de la Compagnie et en langue française que fut publié son

magistral ouvrage *Histoire physique de la mer*, et c'est dans les eaux françaises, à quelques milles des côtes de Provence qu'il exécuta ses expériences dans les diverses branches de l'océanographie.

En notre siècle, il est de mode d'admettre que la science est un véritable objet de luxe et fort coûteux. Il n'est humble débutant qui pour se mettre à la besogne et se livrer le plus souvent à des travaux aussi humbles que lui-même, n'éprouve l'indispensable besoin de splendides laboratoires, d'instruments extraordinairement compliqués et coûteux. On dirait que la valeur des travaux se mesure à la dépense qu'ils ont occasionnée. Sans argent, beaucoup d'argent, extraordinairement d'argent, rien ne compte. Inclinons-nous sous le vent qui souffle, aussi bien nous ne pouvons faire autrement. Ce luxe n'est pas perdu pour tout le monde et il arrive parfois que quelque vrai savant en profite. Certes rien ne se fait de rien, mais si la bonne volonté, le dévouement sincère à la science, l'enthousiasme et l'abnégation à la poursuite de la vérité pouvaient s'acheter et, en s'entendant sur les mots, ils le peuvent, même s'il fallait consacrer à l'acquisition beaucoup des sommes consacrées avec tant de libéralité à ce qui n'est que le squelette de la science, le virement serait avantageux. Moins aux choses, plus aux hommes.

Ces réflexions viennent une fois de plus à l'esprit en relisant le livre de Marsigli. Voici ce qu'il écrit en parlant de ses expériences relatives à la température de la mer. Après avoir exposé la manière dont il avait opéré, il continue en ces termes.

« Il ne manque plus qu'à faire cette même expérience en été « car m'étant trouvé encore sur la côte de Cassis le 30 de juin (1707), « je voulus examiner avec le thermomètre le degré de chaleur du « fond de la mer et après en avoir fait trois observations, à « 4 heures, à 6 heures et à 9 heures du matin, à diverses profon- « deurs, un brigantin ennemi arrivant sur nous nous fit retirer ; « dans ce désordre le thermomètre se cassa et il ne me fut plus « possible de continuer ces observations. »

On se sent pénétré d'admiration en pensant à cet homme qui en vue des côtes de France, observe alternativement son thermomètre

et les criques, les rochers, les petites îles au milieu desquelles il travaille, dans la crainte — et elle n'avait que trop de motifs d'être réelle chez Marsigli qui en avait tâté à deux reprises, — de voir apparaître le brigantin pirate tout près à l'emmener esclave *en Alger*, et encore à la condition expresse de ne point faire de résistance, auquel cas un coup de sabre était vite donné, et l'existence d'un chrétien ne pesait guère sur la conscience des concitoyens de Barberousse. Ils ne manquent pas, les exemples de ce dévouement quand même à la science, dévouement sans l'ombre d'un profit personnel, dévouement de niais digne d'une éternelle vénération. Dumont d'Urville ose affronter les glaces antarctiques avec des bâtiments à voiles; Aimé, pauvre et sans aide, travaille de ses mains, sacrifie ses jours, ses nuits et enfin sa vie. Combien d'autres ne citerait-on pas. L'océanographie a de beaux états de services, en France. Dépêchons-nous de le dire, de le crier, car ce n'est ni les étrangers par intérêt, ni les Français par insouciance qui donneront à ces nobles mémoires le tribut de respect qu'elles méritent, le seul qu'elles aient ambitionné et qu'elles ne reçoivent pas.

La mesure d'une température profonde est une opération hérissée de difficultés. Quand on veut connaître la température de l'air ou d'une eau superficielle, rien n'est plus simple. On y plonge le thermomètre, on l'y laisse un temps suffisant, d'ailleurs très court, pour que l'instrument se mette en équilibre de température et on lit sur la graduation le degré jusqu'où s'est élevé le mercure. Il n'en sera plus de même lorsqu'il s'agira de mesurer la température exacte d'une couche d'eau située à plusieurs centaines ou même à plusieurs milliers de mètres de profondeur.

Tout d'abord entre la surface et la couche profonde à examiner sont intercalées d'autres couches plus froides ou plus chaudes. A supposer que le thermomètre descendu ait pris la température de la couche à étudier, lorsqu'on le remontera pour en faire la lecture, la colonne mercurielle traversant des milieux de températures différentes, changera de longueur, diminuera si les milieux de passage sont plus froids, augmentera s'ils sont plus chauds et rien ne restera de la hauteur occupée au sein de la couche profonde. Quelque

soin que l'on ait pris, la lecture à la surface est fausse, on ne possède pas la température de l'endroit où l'on désirait la connaître.

Ce n'est pas tout. A 10 mètres de profondeur environ, la pression exercée par l'eau est d'une atmosphère, c'est-à-dire de plus de un kilogramme par centimètre carré en plus de la pression normale, et elle augmente de une atmosphère, c'est-à-dire de un kilogramme par chaque descente de dix mètres. A 1 000 mètres, on aura 100 atmosphères; à 10 000 mètres — et l'on est presque parvenu à ces profondeurs — on aura 1 000 atmosphères. En d'autres termes, le thermomètre qui y sera descendu éprouvera une compression de mille kilogrammes sur chaque centimètre carré de sa surface. Sous une telle charge, la paroi de l'instrument, à supposer qu'il ne soit pas brisé, est comme écrasée et le canal vide à l'intérieur duquel se dilate la colonne mercurielle, diminue de diamètre intérieur. Il en résulte que pour une même température à marquer, c'est-à-dire pour une même dilatation, la colonne mercurielle occupe une longueur trop grande et pour peu que la déformation persiste, ne fut-ce que pendant le temps de la remontée de l'instrument, la lecture à laquelle on se livre est exagérée. Il a fallu près de deux siècles, de 1706 à 1878 pour résoudre ces deux difficultés cependant reconnues dès le début.

Marsigli, aux faibles profondeurs où il opérait, n'en souffrit pas beaucoup. Entre 10 et 120 brasses, son thermomètre lui indiqua 10,5 degrés de sa graduation. A supposer que cette température fut incorrecte, l'erreur restait sensiblement identique aux profondeurs étudiées et la loi de constance de la température profonde en Méditerranée qui dépendait de mesures non absolues mais relatives, put ainsi lui apparaître.

En 1757, un demi-siècle après Marsigli, l'illustre physicien anglais Cavendish eut l'idée d'employer un thermomètre à déversement du genre de celui qui fut dans la suite, disposé par Walferdin. On sait en quoi consistent ces instruments.

Supposons le thermomètre ordinaire non plus scellé à sa partie supérieure, mais terminé par une pointe effilée restée ouverte. Si

le réservoir et le tube capillaire étant en partie pleins de mercure, on descend l'appareil dans un milieu plus chaud que celui au sein duquel il a été rempli, le mercure s'y dilatera, une portion sortira par la pointe effilée et lorsque, l'équilibre étant établi, on ramènera l'instrument dans son premier milieu, l'écoulement cessera, la colonne se contractera et pour connaître alors la température à laquelle l'instrument aura été porté, il suffira de le placer dans de l'eau que l'on échauffera progressivement jusqu'à ce que la colonne mercurielle se dilatant, arrive jusqu'à la pointe ouverte sans toutefois la dépasser. A ce moment, la température du bain, très facile à déterminer, est exactement la même que celle du milieu à température inconnue où a été porté le thermomètre; on nomme ces instruments des thermomètres à déversement. S'il s'agit de marquer des minima, on le recourbera en U et on placera la pointe effilée ouverte à l'extrémité opposée. C'est un appareil analogue qu'inventa Cavendish. Il avait de sérieux défauts. Destiné à mesurer des températures plus hautes que celle de son remplissage, thermomètre à maximum selon l'expression consacrée, il n'était pas susceptible de s'appliquer à la mesure des températures profondes toujours plus basses que celles de la surface. Le système à minimum fonctionnait mal, la pression exerçait une influence perturbatrice énorme, enfin chaque expérience exigeait une manipulation longue et délicate.

L'anglais Hales imagina un autre système. Si par un procédé quelconque on parvient à ramener de la couche inférieure à température inconnue un échantillon d'eau soustrait pendant la remontée à tout mélange et à toute cause de modification de quelque genre que ce soit, qu'on l'amène sur le pont du navire, il suffira d'en prendre la température, ce qui n'offrira plus alors aucune difficulté, pour obtenir le renseignement souhaité, la température de la couche profonde. Le problème de la construction d'une pareille bouteille avait été abordé par Hooke en 1667. Cavendish modifia quelque peu le dispositif de Hales sans le changer essentiellement. L'instrument consista en un tube muni d'ouvertures fermées par des soupapes dont le jeu permettait à l'eau, au moment de la des-

cente et jusqu'à la couche à étudier, d'entrer librement et d'en sortir de même. En ce point, on arrêtait la descente, les soupapes cessant d'être soulevées par le mouvement même, retombaient et fermaient le récipient qui remontait jusqu'à la surface avec sa masse d'eau emprisonnée. Un échantillon de cette bouteille fut remis au navigateur Ellis en 1749 qui s'en servit pour mesurer deux températures profondes, l'une par 650 et l'autre par 891 brasses au large de la côte nord-ouest d'Afrique. Les deux fois il trouva la même température, 53 degrés Fahrenheit, soit 11,7 centigrades environ. L'approximation était grossière. Il est évident que le récipient s'était notablement réchauffé dans les couches superficielles et à peu près autant dans les deux cas, la durée plus longue de la remontée compensant l'abaissement plus grand de la température au sein de la couche la plus profonde. L'appareil fut perfectionné par Parrot le jeune, et sous sa forme nouvelle fut employé d'abord par lord Mulgrave accompagné du Dr Irvine, à bord du *Race-Horse*, en 1773 entre la Norvège et le Spitzberg, à une profondeur maxima de 683 brasses.

Le navigateur français Marc Lescarbot remarqua le premier la température élevée des eaux en certaines régions de l'Atlantique et leur refroidissement subit au voisinage de la côte américaine si caractéristique du courant qu'on devait appeler le Cold Wall. Le 18 juin 1606, à 120 lieues dans l'est des bancs de Terre-Neuve, il reconnut que les eaux s'étaient échauffées, bien que l'air fût resté froid et, trois jours plus tard, brusquement, que le ciel s'était embrumé, la mer refroidie et l'air devenu tellement froid « qu'on se serait cru en janvier ». Au retour en France, il constata le même phénomène en sens inverse et il l'attribua à des glaces venues du nord et apportées par la mer « grâce à son mouvement naturel. »

En 1768-1769, l'astronome Chappe d'Auteroche se rendant au Mexique et en Californie, avait pris au moyen d'un « thermomètre marin » dont on ignore la disposition, toute une série d'observations thermométriques superficielles à travers l'océan Atlantique. L'étude se précisait puisqu'on y appliquait la mesure. Cook et

Forster l'imitèrent trois ans après, en 1772, avec une bouteille de Hales et plus tard encore, le même appareil servit à Scoresby en 1810 et 1822, à Kotzebue en 1815, à Wenchope en 1856, à John Franklin et à Buchan en 1818 et enfin à Lenz en 1823.

Les résultats de ces sondages, tout insuffisants qu'ils fussent, permirent néanmoins à Biot qui les compara entre eux, d'énoncer cette loi que les diverses couches d'eau océaniques n'ont pas la même température et à Lenz d'affirmer que, même dans les régions tropicales, le fond de la mer est à une température très basse. Longtemps auparavant, Buffon était arrivé à une pareille conclusion d'une façon beaucoup simple en remarquant qu'un plomb de sonde retiré d'une grande profondeur était extrêmement froid à la main. Ce n'est pas le seul cas où le bon sens ait conduit à la conclusion bien plus nettement qu'un appareil compliqué mais imparfait.

Cependant, de Saussure en 1780 et le voyageur français Péron en 1800, au lieu de ramener un certain volume d'eau de la profondeur à la surface, cherchaient la solution du problème dans un dispositif plus simple. Ils enveloppaient le thermomètre d'une matière mauvaise conductrice de la chaleur. L'instrument descendu à la profondeur voulue était abandonné au contact de l'eau afin de pouvoir se mettre en équilibre de température pendant un temps d'autant plus long que la matière isolante par son épaisseur ou sa nature isolait davantage. On le remontait ensuite rapidement avant qu'il n'éprouvât de modification et on en faisait la lecture. Au prix d'une perte de temps considérable, une partie des difficultés était supprimée, sauf pourtant la pression. Saussure mesura ainsi la température de la Méditerranée à 300 et à 600 brasses.

Vers la même époque, von Krusenstein en 1803 et John Ross en 1817, préférèrent en revenir au thermomètre à maximum et à minimum, rempli d'alcool et de mercure avec index contenant un fragment de fer tel qu'il avait été combiné dès 1781 par sir James Six de Colchester.

En 1832, Dupetit-Thouars, pendant son voyage autour du monde à bord de la *Vénus*, chercha à se mettre à l'abri des effets de la

compression en enfermant un thermomètre de Bunten dans un cylindre de cuivre fermé hermétiquement. Il prit ainsi 59 températures profondes. Au retour, Arago les discuta et en élimina 38 ; le reste, c'est-à-dire 21, fut considéré comme correct.

En 1839, durant leur beau voyage dans le Nord, Bravais et Martins en revinrent au thermomètre à minimum et à maximum de Walferdin. C'était essentiellement, nous l'avons vu, le thermomètre de Cavendish avec cette modification que le mercure, soit en maximum, soit en minimum, se déversait dans une ampoule fermée où il était conservé quoique rendu incapable, dans chaque expérience, de se réunir au reste de la colonne demeuré dans le tube capillaire. Aimé, pour ses remarquables études en Méditerranée, adopta un système analogue, plus précis mais plus compliqué. Afin d'être certain de n'enregistrer que la température de la couche profonde choisie et non les températures plus hautes ou plus basses des couches d'eau sus-jacentes, il fut amené à accoupler deux instruments. Pour un observateur habile comme il l'était, les résultats furent excellents ; cependant l'appareil était trop compliqué et trop délicat pour devenir jamais d'un usage général. Un appareil destiné à des recherches à la mer doit pouvoir être manié par des mains un peu lourdes et par conséquent posséder une rusticité dont les instruments d'Aimé étaient bien éloignés.

D'après Prestwich qui, en 1874, fit le relevé de tous les sondages thermiques, les ramena à la même échelle, en discuta la valeur et dessina les premières cartes par isothermes, depuis les recherches initiales sur la température de la mer en 1749 jusqu'en 1830, on mesura 226 températures profondes et 421 si on va jusqu'en 1833 en y ajoutant celles recueillies par Dumont d'Urville.

En 1851, Maury prit aussi quelques températures profondes avec des thermomètres noyés dans des substances mauvaises conductrices et en 1857, Pullen à bord du *Cyclops* fit usage d'un thermomètre de nouveau modèle, imaginé par l'amiral Fitzroy, l'ancien commandant du *Beagle* à bord duquel s'était embarqué l'illustre Darwin. L'instrument était à ampoule protégée et enregistreur.

En définitive, plus d'un siècle s'était écoulé et le thermomètre

était encore imparfait. Soit que l'on voulut s'opposer aux erreurs résultant du passage à travers des couches sus-jacentes plus froides ou plus chaudes, soit que l'on cherchât à remédier aux effets de la pression, l'instrument disposé pour obvier à une difficulté donnait prise à un autre inconvénient, ou bien, comme celui d'Aimé, le plus précis de tous, il devenait d'une délicatesse exagérée et telle que seul, son inventeur et constructeur était capable de l'employer. Maintenant s'ouvre une période où, grâce à l'initiative intelligente des Anglais, l'océanographie entre résolument dans la voie du progrès pratique à la faveur des nombreuses expéditions qui vont se succéder rapidement. La question de la thermométrie sous-marine prend un intérêt capital : il faut absolument découvrir un instrument simple, commode, pratique et précis pour mesurer les températures profondes. Les inventeurs vont multiplier leurs efforts et le problème ne tardera pas à être résolu.

Tout d'abord l'Américain Joseph Paxton propose un thermomètre métallique du genre de celui de Bréguet. Une bande formée par la juxtaposition de trois lames d'or, d'argent et de platine soudées entre elles et de coefficient de dilatation différent, est enroulée en spirale et commande une aiguille qui se meut sur un cadran divisé. L'instrument ne répond pas aux espérances qu'on avait fondées sur lui. Il est médiocre enregistreur et est influencé par la pression qui modifie sensiblement son élasticité.

En 1868, part d'Angleterre sous la direction de Wyville Thomson, l'expédition du *Lightning*. A cette occasion, après avoir discuté la question de l'évaluation des températures profondes, on exécute en grand nombre de mesures qui malheureusement sont toutes à rejeter. La discussion reprit en 1869, avant le départ du *Porcupine*. On nomma au sein de la Société Royale de Londres une commission sous le nom de « Deep Sea Committee » spécialement chargée d'examiner et de donner son avis sur les instruments à emporter pour la campagne. Les Anglais abordaient sérieusement l'affaire, la considérant non comme destinée à établir le prestige d'une personnalité quelconque et devant durer juste le temps nécessaire à cette personnalité pour atteindre un certain but, quelque honneur

ou quelque place bien appointée, mais comme une question grave important à la vie même de la nation et à ses intérêts les plus immédiats. Paxton présenta à cette Commission son thermomètre métallique qui ne fut pas accepté. Il en fut de même pour sir Charles Wheatstone qui proposa un thermomètre de Bréguet immergé et lu du bord à l'aide d'un dispositif électrique, ainsi que pour Siemens qui combina une sonde électrique. Au contraire, on adopta l'instrument présenté par Miller, modification du thermomètre de Six modifiée elle-même et perfectionnée plus tard par Casella.

Ce thermomètre est à maxima et minima. Que l'on suppose un tube en U terminé à ses deux extrémités par un réservoir. Au milieu une colonne de mercure de chaque côté de laquelle un mélange de créosote, d'alcool et d'eau remplissant entièrement l'un des deux réservoirs et en partie seulement l'autre. A chacune des deux extrémités de la colonne de mercure, un index en verre englobant un petit fragment de fer et qui, entraîné par le mouvement de la colonne dans un sens ou dans l'autre, s'arrête au point extrême où il a été poussé et marque ainsi la température maximum et la température minimum. Après chaque expérience, le fragment de fer des index permet d'amener ceux-ci au contact de la colonne mercurielle au moyen d'un aimant. Le tout est protégé contre la pression par une double enveloppe en cristal remplie d'alcool amylique et contre les chocs par une boîte en cuivre où on l'enferme et qui est percée de trous afin de laisser libre passage à l'eau. Avant le départ, tous ces instruments avaient été essayés à la presse hydraulique sous des pressions variant de 157 à 628 kilogrammes par centimètre carré.

C'est avec ces thermomètres que le *Challenger* accomplit sa mémorable campagne. Beaucoup revinrent brisés et on le comprend car certains furent descendus à 7316 mètres. La pression supportée dépassait donc 732 kilogrammes par centimètre carré.

Le thermomètre Miller Casella n'était pas encore la perfection. Ce n'était, après tout, qu'un thermomètre à maxima et à minima et il présentait tous les défauts de ces sortes d'instruments. Il ne donnait pas la température même de la couche où on l'avait des-

cendu, mais bien la plus haute et la plus basse température des couches d'eau qu'il avait traversées entre la surface et l'endroit où on l'avait arrêté. L'inconvénient était, il est vrai, atténué par ce fait que la température décroissant en général régulièrement de la surface au fond, le minimum indiqué avait de fortes chances d'être bien la température de la couche profonde où l'instrument avait été descendu. Cependant il n'en est pas toujours ainsi. En certaines localités et particulièrement dans les régions polaires, les couches d'eau se trouvent dans un état spécial par suite de l'action simultanée du froid qui rendant l'eau plus lourde la force à descendre, de la fusion des glaces qui ajoutant de l'eau douce, rend l'eau de mer plus légère et la fait monter, enfin de la congélation qui au contraire isolant de la masse d'eau océanique des saumures d'abord peu salées, puis de plus en plus chargés de sels, la concentre, la rend plus lourde et tend à la faire descendre. L'ensemble de ces phénomènes antagonistes produit aux confins des régions polaires un curieux reploiement des couches thermiques appelé le coin thermique polaire qui joue un rôle important dans l'économie de la circulation sous-marine. Dans ces conditions qui furent vérifiées par le *Challenger* lui-même au voisinage du cercle antarctique, le thermomètre Miller-Casella, comme d'ailleurs tous les thermomètres à maxima et à minima, est insuffisant et l'étude de la répartition de la température au sein des mers glaciales, une de celles qui s'imposent, exige des instruments plus convenables que le Miller-Casella.

En 1878, Negretti et Zambra inventèrent leur thermomètre qui est à peu près parfait.

L'instrument consiste essentiellement en un thermomètre ordinaire qui, au-dessus de son réservoir, quelque part le long du tube capillaire, est muni d'un étranglement. Je passe sous silence l'enveloppe extérieure en cristal épais, renfermant du mercure et destinée à prévenir les effets de la compression. Si on place le thermomètre le réservoir en bas, dans un milieu quelconque, la colonne mercurielle se dilate en conséquence et occupe bientôt un certain volume stationnaire pour une certaine température et invariable

tant que cette température ne change pas. Vient-on à retourner l'instrument, la colonne se brise à l'étranglement et se sépare en deux portions qui, respectivement entraînées par leur propre poids, vont se rendre, l'une dans le réservoir, tandis que l'autre descend vers le haut du tube étroit qui maintenant est devenu le bas, le remplit complètement jusqu'à une certaine hauteur mesurée sur une graduation faite à l'envers et dont la lecture donne la température. A partir de ce moment, la colonne visible, puisque celle qui est retournée dans le réservoir est cachée par le mercure de l'enveloppe protectrice de cristal, est sensiblement soustraite grâce à une petite ampoule interposée, à toute variation subséquente de température dans un sens ou dans l'autre. En effet son volume est relativement faible, de sorte qu'il suffit pour le connaître d'une façon rigoureuse, d'une légère correction d'après une table dressée une fois pour toutes et qui est fonction de la température extérieure au moment de la lecture. Cette lecture fournit donc bien la température de la couche où l'on a provoqué le retournement de l'instrument soit à l'aide de l'envoi d'un messager, poids qu'on enfile sur le câble de suspension, qu'on laisse descendre jusqu'au thermomètre et qui, par son choc, en provoque le retournement, soit au moyen de l'hélice Magnaghi qui donne le même résultat par suite du changement de sens de sa rotation lorsqu'on relève légèrement le fil de sonde supportant la monture du thermomètre portant cette hélice. Après chaque expérience, la lecture terminée, on retourne le thermomètre, la colonne mercurielle se recolle du côté du réservoir et l'instrument est prêt à servir de nouveau. Cependant l'absolue précision des mesures au dixième de degré centigrade est douteuse. Pour que la rupture de la colonne mercurielle se produise, il faut que l'étranglement du tube demeure relativement assez large et l'on comprend qu'il y ait alors une légère variation dans le point précis de la coupure. Si l'étranglement est trop capillaire, la rupture risque de ne pas s'effectuer. On ne saurait trop le répéter, le système est presque parfait ; son seul défaut est de coûter assez cher si on l'achète à l'étranger, mais maintenant, on est parvenu à le fabriquer en France aussi bien, sinon mieux qu'ailleurs et à un

LA NASSE EST ENVOYÉE SUR LE FOND

LA NASSE ET SA BOUÉE SONT ABANDONNÉES A LA MER

prix très notablement inférieur. Quand on pense que le thermomètre est devenu, grâce aux études faites surtout en Norvège, non plus un instrument scientifique, mais un véritable outil de pêche destiné a être mis entre les mains de chaque pêcheur, le bas prix de sa fabrication prend un intérêt capital.

Il ne serait cependant pas impossible qu'on parvienne à le perfectionner encore. Sur les exemplaires existants, la longueur de un degré centigrade de l'échelle est d'environ 2 millimètres. Sur une telle longueur, pour peu que l'œil y soit exercé, on arrive à faire la lecture au dixième de degré près. Pourtant il est des cas où une précision plus grande serait utile et où il conviendrait d'être non seulement absolument assuré du dixième de degré, mais d'évaluer avec sécurité le demi-dixième. Il serait donc à désirer qu'un constructeur imaginât une modification du Negretti et Zambra telle qu'on pût d'abord, par un dispositif quelconque, absolument garantir la rupture de la colonne au 1/10e de degré puis, par l'isolement préalable d'une certaine quantité de mercure de la colonne, donner la sensibilité indiquée entre des limites déterminées variables à volonté. Il s'agirait d'une sorte de thermomètre cryoscopique modifié de manière à supporter deux retournements, l'un avant l'immersion pour régler les limites de la sensibilité, l'autre au sein de la couche d'eau profonde afin de provoquer l'isolement de la colonne mercurielle à la température même de la couche. La sérieuse importance prise par la connaissance de la température exacte de l'eau qui doit ultérieurement servir aux corrections de la densité et aux recherches afférentes à la circulation sous-marine, notamment aux courants volcaniques adjacents au sol, font de ce perfectionnement un véritable desideratum.

On a imaginé d'autres modèles de thermomètres sous-marins. Les Suédois ont repris l'idée de Hales, une bouteille entourée d'une épaisse couche de matière isolante et contenant un thermomètre dont on lit l'indication lorsqu'il a été remonté à la surface dans sa bouteille protégée. On prétend être assuré de 1/300e de degré. On demeure, il faut l'avouer un peu sceptique au sujet de ce 1/300e et, en admettant qu'on soit certain de cette précision sur un bâtiment

en pleine mer avec le roulis, le tangage et mille autres difficultés, pratiques, on ne comprend pas trop à quoi servirait tant d'exactitude et l'on se rappelle involontairement ce géodésien qui prétendait mesurer la distance de Vienne à Saint-Pétersbourg au millimètre près. Gardons-nous de l'hypnotisme des décimales, maladie scientifique malheureusement assez commune.

Le Dr Regnard a inventé un instrument enregistreur donnant par une courbe qu'il trace lui-même les variations de la température pendant une durée de temps déterminée. L'appareil est un thermomètre enregistreur ordinaire à mouvement d'horlogerie dont l'intérieur est en communication avec un ballon en caoutchouc rempli d'air, immergé avec lui, subissant la même compression quelle que soit la profondeur et par conséquent régularisant la pression subie intérieurement et extérieurement par les ressorts. L'appareil est très habilement combiné et, malgré quelques inconvénients, il est susceptible de rendre des services à la condition de ne pas être immergé trop profondément.

On a aussi imaginé des thermomètres thermo-électriques ; nous avons dit un mot déjà de ceux de Siemens et de Wheatstone ; il en est de plus nouveaux. Ces instruments, quelque ingénieux qu'ils soient, sont tous entachés du même défaut. Ils sont trop compliqués et trop délicats. Il serait désirable que les inventeurs eussent fait campagne effective à bord d'un navire océanographe, non pas à petite distance des côtes, rien que pour essayer leur invention, mais dans les réelles conditions de la pratique, par temps plus ou moins agité, sous la pluie ou le soleil, en d'autres termes en service courant et non en service d'essai. Dans ces conditions, il y a tout lieu de croire que leurs inventions seraient modifiées, à supposer tout d'abord que la plupart d'entre elles fussent conservées.

Ainsi donc l'instrument dont on se sert d'une façon à peu près constante pour mesurer la température de la mer dans les couches profondes est le thermomètre Negretti et Zambra. Quand on désire obtenir des températures en série verticale, opération qui devient de plus en plus fréquente parce qu'elle est intimement liée à la

détermination des densités de l'eau de mer sur une même verticale, entre la surface et le fond, on superpose les thermomètres à des intervalles connus sur le même fil de sonde. On en accroche quelquefois dix ou douze. Les Américains de l' « U. S. Fish Commission », à bord du *Grampus*, en ont superposé jusqu'à dix-sept. Rien ne limite le nombre des instruments sinon la force portante du fil de sonde et la crainte assez naturelle d'une grosse perte d'argent en cas de rupture car chaque thermomètre avec sa monture vaut, en France, une soixantaine de francs. On comprend l'émotion ressentie en attachant une dizaine de ces instruments à un fil d'acier qu'une coque ancienne dont la trace même demeure invisible, prive sans qu'on puisse le soupçonner, de plus des trois quarts de sa force portante. Ce n'est pas sans raison que le Prof. J.-Y. Buchanan écrivait un jour. « Je ne puis m'empêcher de considérer comme un acte de cruauté envers les instruments, le fait d'en attacher un trop grand nombre sur le même fil. » D'autre part il serait mauvais de les suspendre tous à un câble trop fort qui non seulement se manœuvre très lentement, mais encore communique aux instruments des secousses véritablement au-dessus de celles qu'ils peuvent et doivent supporter. Il vaudrait mieux exécuter le sondage thermique vertical en deux ou trois fois en ne mettant chaque fois sur le simple fil de sonde qui est en réalité un fin câble d'acier à 9 brins ou 3 torons, que la moitié ou le tiers des instruments. Le changement de place du navire, d'ailleurs aussi immobilisé que possible, serait négligeable, les thermomètres ne seraient pas brutalisés et il est même probable, vu la rapidité de la descente et de la remontée, que la durée de l'opération, loin d'être allongée, serait peut-être même raccourcie.

Quoi qu'il en soit, les thermomètres étant disposés en série, on les retourne tous en même temps ou bien en relevant légèrement le fil s'ils sont munis d'hélices Magnaghi, ou bien avec des relais de messagers Rung déclenchés les uns après les autres et les uns par les autres, à partir de la surface, au moyen d'un premier messager envoyé du bord.

Si l'on se propose de mesurer des températures superficielles, on

emploie divers systèmes très simples. Un thermomètre de Meyer enveloppé de matière isolante ou bien un thermomètre entouré d'une sorte de cylindre en verre épais avec monture en cuivre pour le protéger contre les chocs et muni à ses deux extrémités de soupapes laissant librement circuler l'eau pendant la descente mais qui se ferment à la remontée et conservent un certain volume d'eau emprisonné dont la température est assez longue à se modifier après que l'instrument a été ramené à l'air. Enfin, le système le plus simple de tous consiste à envoyer le long du bord, à l'avant du navire pour éviter les souillures, un seau en bois ou en toile qu'on abandonne à la traîne pendant quelque temps afin qu'il se mette bien en équilibre de température. On le remonte vivement sur le pont et on y plonge un thermomètre gradué en dixièmes de degré dont on lit l'indication aussitôt que la colonne mercurielle est devenue stationnaire. Hâtons-nous de dire en passant que les déterminations de températures absolument superficielles, c'est-à-dire jusqu'à cinq ou six mètres de profondeur, n'ont de valeur que si elles ont été recueillies avec beaucoup de précautions et d'une embarcation. Prises du bord d'un bâtiment, surtout à vapeur, même immobile ou à peu près, pendant un sondage, les couches d'eau environnantes sont toujours plus ou moins remuées et mélangées par la présence même du bâtiment aussi bien que par le remous de l'hélice, de sorte que le thermomètre ne donne jamais qu'une moyenne assez grossière des températures de toutes ces diverses couches.

Lorsqu'une série de températures suivant une verticale, a été prise, on a l'habitude de représenter graphiquement les résultats sous forme de courbe. Les profondeurs sont indiquées en ordonnées et les températures en abscisses sur deux axes de coordonnées rectangulaires. Quelquefois c'est l'inverse, les profondeurs sont en abscisses et les températures en ordonnées. La différence est sans importance. Pour reporter l'ensemble de ces mesures sur des cartes qu'on dispose elles-mêmes en séries à diverses profondeurs suivant des plans situés à des distances variées de la surface, on note la température trouvée en chaque point placé à sa vraie position et

on entoure d'une ligne l'ensemble des points de même température. On forme ainsi des aires isothermes correspondant soit à des profondeurs différentes pour une même région soit à des époques différentes de l'année pour une même profondeur et une même région et qu'il est d'usage de laver d'une teinte plate rose carmin d'autant plus foncée que la température est plus élevée. Ces cartes parlent aux yeux, et comme sur tous les schémas, les lois de distribution y apparaissent d'une manière pour ainsi dire brutale.

Maintenant que nous connaissons les instruments employés et la façon de nous en servir et de représenter les résultats qu'ils nous apportent, cherchons qu'elles furent les opinions qui eurent cours successivement au sujet de la température au sein des océans. Nous avons vu qu'Aristote, sans énoncer les raisons qui le guidaient, était d'avis que l'eau de mer était plus chaude à la surface que dans les profondeurs. Buffon pensait de même, frappé qu'il avait été par ce fait qu'un plomb de sonde retiré d'une grande profondeur, produit à la main une indiscutable sensation de froid.

La fin du XVIIIe siècle marque le véritable début des études systématiques de thermique marine. Après la première ligne de températures superficielles prises en série régulière à travers l'Atlantique par Chappe d'Auteroche en 1769, viennent les essais de navigation thermométrique inaugurés par Benjamin Franklin en 1770. C'est une histoire qui se relie à celle du Gulf-Stream, ce courant, qui prenant son origine dans le golfe du Mexique et la mer des Caraïbes, traverse le détroit de la Floride entre Cuba et le continent américain, remonte la côte orientale des États-Unis jusqu'aux bancs de Terre-Neuve et là, heurté perpendiculairement par les deux courants froids polaires contournant l'île de Terre-Neuve et débouchant l'un par le détroit de Cabot, l'autre par l'Est de l'île, s'étale sur l'océan, perd en profondeur ce qu'il gagne en surface et passant à l'état de simple dérive, va frapper les côtes occidentales d'Europe dont il adoucit le climat. Il touche le nord de l'Angleterre et la côte de Norvège où il empêche les fjords de geler ; il y permet l'activité commerciale maritime, la seule possible pendant l'hiver sous ces latitudes élevées et, franchissant

le cap Nord, parvient jusqu'aux rivages de l'extrême Sibérie.

« Vers 1769-1770, le « Board of Customs » de Boston adressa une « requête aux bords de la Trésorerie, à Londres, pour se plaindre « de ce que les bateaux chargés du service de la poste entre « Falmouth et New York, mettaient en général à leur traversée « une quinzaine de jours de plus que les bâtiments marchands « entre Londres et le Rhode-Island. On proposait en conséquence « de prendre dans l'avenir comme port d'arrivée, Newport au lieu « de New York. »

Tels sont les termes mêmes par lesquels Franklin commence l'exposé de ses travaux. Ainsi les bateaux de commerce américains plus chargés, ayant à faire une traversée plus longue, restaient moins longtemps en route que les paquebots anglais. Franklin, alors général postmaster de la Nouvelle-Angleterre, fut frappé de cette anomalie qui intéressait directement le service dont il était chargé. Le capitaine baleinier Folger de Nantucket qu'il rencontra à Londres, lui en donna l'explication.

En effet ce dernier, comme d'ailleurs tous les capitaines baleiniers du Rhode-Island, connaissait l'existence d'un courant portant de l'ouest à l'est, à travers l'Atlantique. Le courant, en forme de bande à bords nettement délimités, était caractérisé par une température plus élevée que celle de la masse des eaux environnantes et précisément cette température élevée en faisait une barrière en quelque sorte infranchissable pour les baleines qui restaient cantonnées au nord et au sud de ses limites et en deçà desquelles il était inutile de les chercher; le fait importait particulièrement aux baleiniers alors très nombreux en Amérique. Il concernait aussi les navires faisant les traversées d'Amérique en Angleterre ou inversement et qui, dans le premier cas, avaient bien soin de se placer en plein courant afin d'être poussés par lui tandis qu'au contraire, ils l'évitaient le plus possible en descendant au sud lorsqu'ils avaient à faire la traversée inverse. Ce secret connu des marins américains était ignoré des Anglais qui, revenant vers la Nouvelle-Angleterre par la ligne la plus directe, avaient contre eux le courant pendant toute la durée de leur traversée et perdaient ainsi de

vingt à soixante milles par jour. A la demande de Franklin, le capitaine Folger traça sur une carte le cours du Gulf-Stream et, par ordre du General Post-Office, une planche en fut gravée et plusieurs exemplaires furent adressés à Falmouth pour être mis à la disposition des capitaines anglais. Selon la règle à peu près immuable en pareilles circonstances, ceux-ci s'empressèrent de n'en tenir aucun compte.

Pendant ce temps, les relations se tendaient entre les colonies et la métropole. Durant son voyage de retour d'Angleterre en Amérique, en avril et mai 1775, Franklin reprenant l'exemple donné six ans auparavant par Chappe d'Auteroche, employa systématiquement, entre Londres et Philadelphie, le thermomètre pour mesurer les températures de la mer et il constata qu'avec cet instrument, il était possible de juger de la position occupée par un navire par rapport au courant. Ces conclusions furent confirmées en octobre et novembre de l'année suivante, 1776, pendant son voyage en France comme envoyé officiel des nouveaux États-Unis et, pour la troisième fois, pendant le voyage de retour en 1782. Le Gulf-Stream était toujours plus chaud que les eaux de chaque côté de son cours, sa couleur était plus bleue et, la nuit, il n'était pas phosphorescent. Selon le terme même employé par Franklin, le thermomètre était devenu un instrument de navigation.

Du reste, l'illustre fondateur de l'indépendance américaine ne se borna pas à l'étude thermique des eaux superficielles. Pendant son dernier voyage en 1785, il essaya d'obtenir des températures profondes en recueillant de l'eau jusqu'à vingt brasses à l'aide d'une bouteille ordinaire et plus bas avec une boîte fermée par des soupapes à chacune de ses extrémités. Il découvrit ainsi qu'au large de la Delaware, par 18 brasses de profondeur, l'eau avait 58 degrés Fahrenheit tandis qu'elle en avait 70 à la surface, soit une différence de température de 12 degrés Fahrenheit ou 6,7 degrés centigrades.

Tant que les hostilités avaient duré entre les États-Unis et l'Angleterre, Franklin avait cessé d'insister sur sa découverte. Sujet anglais, il avait rempli son devoir, mais alors que des escadres

ennemies traversaient continuellement l'Atlantique, amenant des troupes, l'espèce d'aveuglement des Anglais à ne point vouloir raccourcir leurs traversées favorisait les efforts militaires des États-Unis. Un seul d'entre eux cependant, le Dr Charles Blagden, de l'armée royale, avait été frappé des conclusions de Franklin et, ayant été embarqué sur la flotte anglaise, il se livra à son tour à des mesures de températures pendant les années 1776 et 1777. En 1781, il communiqua ses observations à la Société Royale en insistant, lui aussi, sur le parti qu'on tirerait du thermomètre comme instrument de navigation.

Peu après les découvertes de Franklin et de Blagden, M. Pownall ancien gouverneur du Massachusetts, publia en 1787 une grande carte accompagnée d'instructions nautiques sur le cours du Gulf-Stream étudié au moyen du thermomètre. Mais le premier traité didactique fut écrit par un neveu de Franklin, le colonel Jonatham Williams qui l'accompagna pendant son dernier voyage, l'aida à prendre ses mesures, continua ses expériences et les résuma dans une note présentée d'abord en 1790 à l' « American Philosophical Society » et ensuite, en 1799, dans un livre sur la navigation thermométrique où il préconisait l'emploi du thermomètre non seulement pour l'étude du Gulf-Stream, mais même pour découvrir l'approche des côtes ou le voisinage des hauts-fonds et des écueils. C'était pousser un peu loin l'enthousiasme. Il en est assez généralement ainsi pour les disciples toujours disposés à outrer les opinions du maître. Le temps se charge de ramener les choses à leur vraie valeur et le progrès scientifique ressemble à la marche de ces pèlerins qui s'avancent vers le sanctuaire en faisant trois pas en avant et deux pas en arrière. En 1800, le capitaine William Strickland reprit les mêmes études avec un peu plus de modération.

Quoi qu'il en soit, la guerre terminée, Franklin fit réimprimer sa première carte en France, et selon l'habitude qu'on avait alors de ne point prendre uniquement en considération l'utilité immédiate et de laisser encore une toute petite place à l'art, dans un coin de cette carte, au pied d'un gros rocher où est gravé le titre « Chart

of the Gulf-Stream », était représenté l'auteur lui-même, avec son chapeau et sa veste de quaker, une main dans sa poche et en conversation avec le dieu Neptune, armé de son trident, coiffé de sa couronne, le bas du corps en queue de poisson et en train de divulguer les mystères de son empire. On regrette de ne point apercevoir, quelque part sur le dessin, un thermomètre, le véritable héros de l'affaire.

Aujourd'hui le temps a quelque peu atténué l'enthousiasme primitif et comme l'on connaît mieux les lois de la répartition de la température à la surface des eaux, on est parvenu à une plus saine appréciation des choses. Les conditions particulières de la côte orientale des États-Unis immédiatement baignée par un courant très froid, le *Cold wall*, descendant de la mer de raffin, bordé lui-même par la bande étroite et nette d'un courant très chaud s'avançant en direction diamétralement opposée, permettent dans une certaine mesure l'atterrissage au moyen du thermomètre. Le procédé spécial à la région n'est pas d'une application générale. Mais si le thermomètre n'est pas susceptible de rendre tous les services qu'on en attendait au début, on aurait tort de dédaigner systématiquement son secours. J'ignore si cela se fait encore. Il y a une trentaine d'années, à bord des paquebots transatlantiques de la ligne du Havre à New York, dans les parages des bancs de Terre-Neuve, pendant ces longues heures où, dans la brume épaisse, au milieu de l'atmosphère cotonneuse du jour et de l'opacité lourde de la nuit, on ne cessait d'entendre le hurlement lugubre de la sirène à vapeur, on prenait fréquemment la température de la mer qui renseignait sur la position du bâtiment et aussi sur le voisinage si dangereux des icebergs qu'il n'était pas rare de rencontrer sur la route, même en passant au sud des bancs.

Maintenant qu'une énorme quantité d'observations a été recueillie, la science est en mesure d'énoncer les lois générales relatives à la répartition de la température à la surface et dans les profondeurs des eaux océaniques. On aurait presque pu les prévoir si, procédant logiquement, on avait commencé par étudier patiemment d'une part chacune des propriétés de l'eau de mer et d'autre part la

répartition des divers climats terrestres. La distribution de la température dans l'océan est, dans ses grandes lignes la résultante en quelque sorte fatale de ces diverses variables.

L'eau de mer est un liquide salé possédant une chaleur spécifique égale, en moyenne, à 0,95 environ, prenant facilement l'état de vapeur et qui, recouvrant les trois quarts de la surface du globe, se trouve sous des latitudes très froides où elle se congèle et sous des latitudes très chaudes où elle s'échauffe et s'évapore. Chacune de ces propriétés mesurée, figurée par un chiffre, on en a conclu les conséquences. Quand on s'est borné à philosopher, on n'a jamais manqué d'être conduit à des erreurs ou à des absurdités. En océanographie comme en toutes les autres sciences, il faut d'abord une étude précise et chiffrée, c'est-à-dire indiscutable de la matière soumise à l'examen puis, tout étant bien connu, faire un simple appel au bon sens suivi d'une vérification expérimentale sur le terrain. On applique l'admirable formule de Mohr — « La nature répond à toutes les questions qui lui sont adressées, par un oui, par un non ou par le silence et dans ce cas, c'est que l'interrogateur a mal posé sa question. » — Après que le savant aura étudié l'eau de mer, par analyse, par synthèse, par chiffres, qu'il aura examiné et comparé des cartes météorologiques et que, guidé par son bons sens, le plus précieux et le plus précis des instruments scientifiques, il interrogera la nature en plongeant son thermomètre dans l'océan, celle-ci ne restera jamais silencieuse ; elle répondra et la vérité apparaîtra.

La mer étendant la nappe de ses eaux sous des climats froids et sous des climats chauds, régions polaires, régions tropicales et régions tempérées intermédiaires, aura superficiellement des températures différentes et c'est ce que montre en effet une carte thermique superficielle de l'océan. En outre, comme en un même lieu, la température de l'air est plus froide en hiver et plus chaude en été, il en résulte qu'en un même point de l'océan, la température superficielle varie selon les saisons et d'autant plus que le climat atmosphérique subit de plus grandes perturbations. C'est encore ce que prouve l'expérience. On en déduira que si, pour un

motif quelconque de science pure ou d'application — pour l'industrie des pêches, par exemple, — on a besoin de connaître la température superficielle de la mer en une localité quelconque, il faudra en dresser expérimentalement des cartes à diverses époques de l'année. D'une manière générale, les variations seront d'autant plus faibles que le climat sera plus régulier et par conséquent nulle part plus que dans les régions tropicales.

La distribution de la température en profondeur est un peu plus compliquée. Pour en découvrir les lois, il convient d'en appeler aux propriétés thermiques de l'eau. Il est évident que plus l'eau sera soustraite, en un même lieu, aux variations du climat, c'est-à-dire plus elle sera profonde et plus elle possédera une température régulière et uniforme en tout temps. C'est ce qui est confirmé par l'expérience. Comme les variations atmosphériques sont diurnes, annuelles et séculaires, en s'astreignant à sonder thermiquement d'une façon continue en un même point et à diverses profondeurs, on trouvera en allant de la surface vers le fond, d'abord des couches dont la température variera pendant le cours d'une même journée. La variation s'atténuera à mesure qu'on descendra davantage et bientôt on parviendra au sein d'une couche où la température ne changera pas pendant les vingt-quatre heures. En d'autres termes, à mesure qu'on descendra, on trouvera d'abord une couche limite des variations diurnes, puis une autre plus profonde, limite des variations saisonnières, et plus bas encore une couche limite des variations séculaires. Tantôt ces couches seront assez éloignées les unes des autres, tantôt elles seront rapprochées selon l'influence de diverses variables dont la principale est le climat spécial atmosphérique régnant au-dessus de la région. Dans tout ce qui précède, on s'est borné à l'économie thermique en quelque sorte théorique de l'océan et l'on n'a pas pris en considération les courants qui sont un très important élément de perturbation de cet équilibre. Au sein des lacs d'eau douce où les conditions sont quelque peu différentes de celles de la mer à cause de l'absence de salure, ces diverses couches en général assez voisines les unes des autres, constituent ce que les Allemands ont nommé la couche

de variation brusque, la *Sprungschichte* dont la disposition et la profondeur en chaque lac est une intéressante donnée limnologique. En mer, la couche de variation brusque correspondrait sensiblement à la limite des variations saisonnières. On a cherché à l'évaluer dans les diverses mers tropicales, les seules où elle ait sa raison d'être tant à cause de la régularité du climat que par suite du calme relatif des eaux. Selon Schott, elle serait située entre 25 et 80 mètres dans l'Atlantique, entre 90 et 140 mètres dans l'océan Indien, entre 110 et 180 dans l'océan Pacifique, enfin entre 100 et 165 mètres dans la mer Indo-malaise.

L'eau de mer, comme la grande majorité des corps, se dilate par échauffement et se contracte par refroidissement. Dans le premier cas, elle devient plus légère, dans le second elle s'alourdit. A ne considérer que ce point particulier, il en résulte que les eaux profondes qui ont été entraînées vers le fond par leur poids, seront plus froides que les eaux de surface. La vérification expérimentale de cette loi est complète.

L'eau douce à la température de 4 degrés environ présente un maximum de densité. Il en résulte que dans les lacs suffisamment profonds, la couche la plus basse possède cette température. Il n'en est pas de même pour l'eau salée et c'est pourquoi le fond de l'océan ne peut pas être à une température uniforme. Péron, en 1805, l'avait supposé occupé par des glaces éternelles et il croyait en conséquence que toute vie y était impossible. Si au lieu de raisonner on avait expérimenté, on aurait immédiatement reconnu que la glace d'eau douce ou d'eau salée est plus légère que l'eau liquide. L'expérience aurait été faite très simplement en jetant un morceau de glace dans l'eau ; si on avait tenu à y mettre plus de précision et prendre une densité dans un laboratoire, il aurait suffi d'une heure à peine. Or les observations sur le terrain montrent en effet que le fond de la mer n'est pas couvert de glaces éternelles — abstraction faite des glaces dites de fond, phénomène particulier et local sur lequel il est inutile de s'arrêter pour le moment — et que, quelle que soit la profondeur du sol sous-marin, abondante ou restreinte, on y trouve partout une faune d'êtres vivants.

On avait donc pensé que l'eau de mer avait la même température de maximum de densité que l'eau douce. Aussi sir James Clark Ross qui partageait cette opinion, affirma-t-il que le fond de l'océan était partout à 39 degrés Fahrenheit, soit environ 4 degrés centigrades. L'exploration directe ne manqua pas de démentir l'hypothèse. Lorsqu'en 1837, le physicien français Despretz eut le premier constaté que la température du maximum de densité de l'eau de mer variait avec sa salinité, expérience qu'il eût fallu exécuter avant d'énoncer la moindre opinion, on eut l'explication de la réponse négative de la nature.

Le professeur O. Pettersson, dans son laboratoire de Stockholm, a analysé les diverses saumures résultant de la fusion de morceaux de glace recueillis par le professeur Nordenskjöld pendant son mémorable périple de l'Asie, le long de la côte septentrionale de Sibérie. Il compléta ses analyses par un certain nombre d'études synthétiques sur des glaces de mer artificielles et fut ainsi conduit à affirmer d'une manière formelle et indiscutable, puisqu'il s'appuyait sur des chiffres, qu'un morceau de glace de mer était une véritable roche hétérogène comparable à un granite, par exemple. De même que celle-ci est composée de minéraux différents, un bloc de glace de mer résulte de l'accolement de grains solides de saumures de salure variable et dont chacune se congèle à une température différente. La disposition des couches d'eaux marines sera par suite particulièrement compliquée dans les régions polaires glacées, puisque leur superposition, due en définitive à leur densité, variera selon le mode et la puissance de la congélation superficielle qui, isolant par solidifications successives des portions hétérogènes, modifiera la salure aussi bien que la température des saumures restées liquides et qui se seront mélangées en plus ou moins fortes proportions avec les eaux sous-jacentes restées liquides. Ces considérations expliquent en partie la disposition affectée par le coin thermique polaire.

On appelle chaleur spécifique d'un corps la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré centigrade sa température. Cette caractéristique physique est évaluée en calories, quantité de cha-

leur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau distillée. Or, la mesure de la chaleur spécifique, expérience très précise et très facile à exécuter dans un laboratoire, a montré que si pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau douce, il fallait une calorie, pour opérer le même effet sur un kilogramme d'eau de mer, il suffisait en moyenne de 0,959 calorie et sur 1 kilogramme d'air atmosphérique qui, on le sait, pèse seulement 1 gr. 3 par litre, 0,2374 calorie seulement étaient nécessaires. Ces chiffres prouvent que pour échauffer d'une même quantité un même volume, il faut un peu moins de chaleur, pour l'eau salée que pour l'eau douce tandis qu'une quantité très considérablement moindre de chaleur suffit pour l'air.

Toute l'économie thermique du globe que nous habitons, terre, océan et atmosphère, est la conséquence de ces chiffres. Pour ne s'en tenir qu'à la mer, ils démontrent que celle-ci est le grand régulateur de température et, si on les applique en même temps aux terres et aux mers, ils expliquent les climats continentaux avec leurs brusques excès et la douceur régulière des climats marins.

En effet, si l'air a besoin de peu de chaleur pour s'échauffer, il s'échauffera ou se refroidira rapidement et comme son coefficient de dilatation est très élevé, comme en outre il jouit de cette propriété que la vapeur d'eau qu'il contient toujours à l'état de mélange augmente encore sa légèreté, il en résulte que pour une très faible élévation de température, pour un rayon de soleil, pour un nuage, l'air se livrera à des mouvements presque désordonnés, montant, descendant, emporté du nord au sud, de l'est à l'ouest, donnant naissance aux vents et à leurs mouvements si compliqués qu'on n'en connaît et que l'on n'en connaîtra jamais que les lois d'ensemble. Les lois de détail sont la résultante de causes tellement multiples qu'elles dépassent la prévision et font alors de la météorologie pratique ou prévision du temps, une science en grande partie empirique.

Combien au contraire l'eau est plus sage. Lente à s'échauffer, elle est lente à se refroidir. Quand l'air qui la recouvre est froid,

elle lui cède lentement et régulièrement sa chaleur; quand il est plus chaud, c'est encore lentement et régulièrement qu'elle la lui soutire. Un simple calcul montre qu'en abaissant sa température de 1 degré, 1 centimètre cube d'eau de mer élève de 1 degré un volume de 3 129 centimètres cubes d'air ou plus de 3 litres! La chaleur que l'océan a accumulée pendant le jour et pendant l'été est rendue à l'atmosphère pendant la nuit et pendant l'hiver.

Un savant dont l'esprit particulièrement ingénieux excelle à découvrir des comparaisons qui frappent l'imagination et se gravent d'une façon inoubliable dans la mémoire, le Prof. F. A. Forel de Morges, a calculé d'après le refroidissement du Léman, durant le rigoureux hiver de 1879, que la quantité de chaleur restituée à l'air par la surface du lac était égale, par vingt-quatre heures, à celle qu'aurait donnée la combustion de 250 000 tonnes de houille.

Il y a encore à tenir compte de l'évaporation que subit l'eau de mer, relativement faible dans les contrées froides, très forte dans les régions tropicales et qui, la concentrant, la rend plus lourde. Cependant comme l'évaporation coïncide presque toujours avec une élévation de la température extérieure que partage l'eau de mer, il en résulte que celle-ci devient plus légère. Mais comme d'autre part l'évaporation qui est une vaporisation est toujours accompagnée d'un refroidissement, il en résulte que, de ce chef, l'eau de mer devient plus froide et par conséquent plus lourde.

On a là un exemple des forces antagonistes naturelles dont la résultante est l'état d'équilibre instable thermique et dynamique de la masse des eaux océaniques. C'est le cas général. Quel que soit le phénomène naturel que l'on prenne en considération, immense lorsqu'il s'agit de la mer ou de l'air, mais aussi réellement pour le plus grand que pour le plus humble, tout est dans tout. Un phénomène naturel est une équation unique à un nombre considérable, on dirait presque infini, d'inconnues. Selon les circonstances, certaines d'entre elles sont nulles, tandis que certaines autres ont une importance prépondérante, ou bien celles qui tout à l'heure étaient prépondérantes s'annulent ou à peu près, tandis que celles qui

étaient nulles deviennent prépondérantes. Au total, le phénomène reste sensiblement le même dans sa manifestation. Quoi qu'il en soit, l'équation est mathématiquement impossible à résoudre et telle est la raison pour laquelle on ne peut obtenir que des solutions empiriques. Aucun exemple ne le montre mieux que l'équilibre thermique actuel des eaux de l'Océan dont il sera relativement aisé de prévoir les lois principales, tandis qu'il faudra se contraindre à mesurer directement dans chaque cas particulier, quitte à chercher et à trouver ensuite l'explication spéciale à chaque anomalie constatée.

D'une façon générale, la courbe d'un sondage thermique en série verticale figurée comme il a été indiqué, offre toujours le même aspect. A partir de la surface, on trouve une portion plus ou moins irrégulière selon le moment de l'année où le sondage est exécuté et correspondant aux diverses variations diurnes, annuelles ou séculaires. Puis, lorsqu'on a atteint une certaine température variable, selon la localité, elle prend une courbure régulière, la température s'abaissant progressivement et de plus en plus lentement à mesure que la profondeur augmente pour arriver, sauf exceptions, vers 2 degrés entre 5 000 et 6 000 mètres dans les régions tropicales et même jusqu'à — 2,5 degrés dans les régions polaires.

En définitive, au point de vue thermique, la masse des eaux océaniques se divise verticalement en deux zones, l'une profonde de calme ou de régularité presque absolue, l'autre superficielle et relativement peu épaisse où se font sentir les variations. Tout contribue à un échange incessant, vertical et latéral, des eaux les unes avec les autres, la variation n'est possible à prévoir qu'en gros et elle n'est exactement déterminable qu'empiriquement, par une innombrable série de mesures directes, puisque l'équilibre thermique dépend non seulement de la somme des actions exerçant une influence au point considéré, mais encore de la somme de ces actions aux points voisins. L'eau s'échauffe, elle monte vers la surface ; l'eau se concentre, elle descend ; elle se refroidit pour une cause quelconque, refroidissement direct ou évaporation, elle

descend; elle se mélange d'eau douce soit au large par l'addition d'eaux de pluie, soit le long des côtes par l'apport des fleuves, elle devient plus légère et remonte. Vers les pôles se forment des glaces, l'eau restée liquide se concentre en sels, elle s'alourdit et descend; la débâcle, le dégel surviennent-ils, elle s'adoucit et remonte. Tout prend une influence : les courants froids venant des pôles, les courants chauds venant des régions équatoriales, la configuration géographique des continents, le relief du fond, la communication plus ou moins facile avec les mers polaires ou les mers chaudes, l'existence d'un seuil comme au détroit de Gibraltar ou la crête Wyville-Thomson, au nord des Hébrides, modifient l'état thermique. La complexité devient infinie. Quand on considère l'océan dans son ensemble, si l'on ne s'occupe que d'un point déterminé, on se trouve, si l'on peut employer cette expression, en présence d'un équilibre instable permanent, c'est-à-dire différent selon les époques de l'année, mais sensiblement le même aux mêmes époques et qui ne se connaît qu'empiriquement, par une suite prolongée de mesures directes figurées par des cartes.

La densité exerce une influence prépondérante sur la répartition thermique; elle est cause et conséquence à la fois. L'équilibre mécanique d'une couche d'eau, absolument instable d'ailleurs dans les couches en mouvement puisqu'il donne naissance à la circulation sous-marine, est dû à la densité qui constitue la véritable individualité d'une eau de mer. Or la densité est le total indivisible de la quantité de sels en dissolution ou salinité et de la température. Ces deux variables sont inséparables. On arriverait aussi bien à des conclusions erronées, parce qu'elles seraient essentiellement artificielles, si on tentait de séparer la salure de la température et d'étudier isolément l'une ou l'autre. On ne saurait trop appuyer sur cette considération si l'on veut comprendre l'équilibre mécanique de la mer. La salinité seule sans la température, ne signifie rien à ce point de vue, la température seule sans la salinité ne signifie pas davantage. Il faut absolument en appeler aux deux considérées indivisiblement et cette donnée se nomme la densité à la température *in situ*.

Prendrons-nous ici l'étude de chaque cas particulier ou même de certains phénomènes ne se produisant que dans certaines localités restreintes comme le reploiement en coin des couches thermiques vers les limites des régions polaires. Nous risquerions d'être entraînés bien loin. Entrerons-nous dans le détail de la distribution de la température dans l'océan tout entier ? Il nous suffira de dire, comme chiffres utiles à garder dans la mémoire, que les extrêmes de températures de surfaces sont compris entre — 3,7 degrés environ et 32 degrés, le maximum se rencontrant dans la mer Rouge, le golfe du Mexique et le golfe Persique. Quant au reste, on se reportera aux cartes spéciales. C'est faire preuve d'une érudition facile que de décrire compendieusement ce qu'un graphique montre d'un seul coup d'œil. Quoique plus d'un ouvrage scientifique grossisse ainsi le nombre de ses pages et y gagne aisément une trompeuse respectabilité, ce n'est pas une raison pour en suivre l'exemple.

Une dernière question. D'où provient la très basse température constatée au fond des océans? Évidemment d'une totalisation d'effets thermiques résultant pour la plus grande part de tous les climats terrestres depuis l'antiquité la plus reculée jusqu'aux climats actuels. Sans cesse les centres de froid ont envoyé des eaux qui plus denses ont gagné les fonds les plus bas et comme ceux-ci sont protégés par leur profondeur même contre le réchauffement ultérieur, il s'est fait un équilibre thermique et en même temps dynamique, sorte de compromis entre l'apport de calorique venant de régions plus ou moins éloignées et les conditions climatiques immédiatement sus-jacentes. Une fois l'océan parvenu à cet état d'équilibre ayant mis des siècles à s'établir, il n'y avait aucun motif pour qu'il éprouvât le moindre changement et puisque les eaux froides plus lourdes s'en allaient dans les profondeurs et se trouvaient par cela même d'autant plus soustraites aux causes perturbatrices, il ne pouvait qu'être ce qu'il est et prendre un état thermique profond vraiment géologique et fossile.

A considérer de plus près les choses, il ne serait pas impossible que le régime thermique de l'océan fût celui d'une foule de

cuvettes topographiques indépendantes, plus ou moins irrégulières de forme et juxtaposées, recouvertes au niveau de leurs bords par une nappe d'eau de température uniforme, s'étendant sur d'autant plus de ces cuvettes que l'ensemble de celles-ci possède des bords plus relevés et surmontée elle-même de nappes thermiques distribuées d'une façon régulière jusqu'à la surface. On sera fixé sur la valeur de cette hypothèse par l'examen de cartes par plans horizontaux parallèles situés à des profondeurs différentes et à la fois thermiques et bathymétriques. Malheureusement le nombre des mesures directes ne semble pas être encore suffisant pour permettre de dresser aujourd'hui ces cartes avec la précision indispensable.

Dans la nature, tout se tient et l'immense intérêt qu'éprouve celui qui a l'honneur et le bonheur de se livrer à l'étude de ces lois et de s'y consacrer tout entier sans vaines préoccupations étrangères, c'est de voir de plus en plus nettement à mesure qu'il s'avance dans ses travaux, l'admirable enchaînement des choses. Que l'on prenne au hasard le plus simple des phénomènes naturels, le plus humble, d'apparence frêle et légère comme ces fils qu'on distingue, par les beaux jours, flottants au milieu de l'air, qu'on en saisisse l'extrémité infiniment ténue, il va se dérouler, grossir par transitions insensibles et finir par entraîner l'immensité, de sorte que l'homme malgré son désir, sa soif de vérité, sera forcé de l'abandonner parce que la tâche dépassera des milliers et des milliers de fois les forces de son corps et celles de son intelligence. Dans la nature, il n'est point de petites choses.

On a reconnu que l'économie thermique de l'océan était la conséquence immédiate des propriétés physiques et chimiques de l'eau salée, de sa fluidité, de sa dilatabilité par la chaleur, de sa chaleur spécifique, de son mode de congélation, de sa densité. Ces mêmes propriétés essentielles, rigoureusement mesurables dans le laboratoire sur quelques dizaines de grammes d'eau, vont encore régler la distribution des êtres marins. Il suffira d'adjoindre aux lois inorganiques mesurées expérimentalement, quelques lois organiques mesurées elles aussi expérimentalement. On pourra alors prévoir

ce qui doit s'accomplir, et après chaque prévision, la nature interrogée directement par l'observation répondra.

Une première question se pose. Quelle est la température propre des êtres qui vivent au sein des eaux? Il ne s'agit pas, bien entendu, des cétacés, mammifères marins à sang chaud qui malgré leur taille le plus souvent gigantesque, ne constituent qu'une extrême minorité, une exception infime parmi la multitude des êtres distribués depuis la surface de la mer jusqu'au plus profond de ses abîmes. Le Dr Regnard a entrepris de résoudre le problème comme la plupart de ceux qui concernent la physionomie des animaux aquatiques et il y est parvenu à l'aide d'une série d'expériences aussi élégantes et simples dans leur manipulation que nettes dans leurs conclusions.

Pour savoir la température propre des poissons, le Dr Regnard a disposé l'expérience suivante. Dans un bassin d'eau, on place un poisson qu'on pique avec une aiguille thermo-électrique fixée à un fil métallique très fin maintenu à la surface par un léger flotteur et en communication avec une pile. Une seconde aiguille thermo-électrique plonge dans l'eau du bassin. Le poisson nage librement entraînant partout avec lui l'aiguille plantée au milieu de ses tissus. Les deux aiguilles sont reliées à un galvanomètre. Une différence de température de 1/50e de degré entre les deux aiguilles suffit pour faire dévier l'aiguille du galvanomètre d'un angle rendu encore plus apparent par un dispositif optique. On constate cependant que l'aiguille du galvanomètre demeure toujours immobile et par conséquent que le poisson possède la même température que celle de l'eau qui l'entoure.

Cependant ce poisson respire. Grâce à ses branchies, il s'empare de l'air en dissolution dans l'eau, s'en assimile l'oxygène, le transforme en acide carbonique, et par suite effectue une combustion et dégage de la chaleur. Afin de la mesurer, on remplit une caisse de duvet, matière très mauvaise conductrice destinée à éviter toute déperdition de chaleur produite intérieurement et toute acquisition de chaleur provenant de l'extérieur. On place dans la caisse deux flacons en partie remplis d'eau et où plongent deux

thermomètres soigneusement comparés entre eux et qui marquent évidemment la même température. On introduit alors dans l'un des flacons une anguille préalablement pesée et qui peut y faire un assez long séjour car en dressant la tête, elle vient respirer à la surface de l'eau. Si elle y était complètement immergée, elle ne tarderait pas à la dépouiller de son oxygène et périrait bientôt asphyxiée. Après un certain temps, on constate que la température du flacon où est l'anguille comparée à celle de l'autre flacon servant de témoin, ne s'est que très légèrement augmentée. Un calcul facile permet de reconnaître que la chaleur dégagée par l'animal n'est que de 1,6 calorie par gramme, quantité très faible qui, par suite de la conductibilité et de la chaleur spécifique de l'eau, est immédiatement en quelque sorte soutirée par celle-ci et distribuée dans toute la masse dont la température n'est élevée que d'une manière infinétésimale, comme par exemple la chaleur venant d'une étoile élève la température de notre globe.

Il y a lieu maintenant, de chercher quels sont les extrêmes de température susceptibles d'être tolérés par les poissons. On introduit un poisson dans un vase plein d'eau continuellement aérée artificiellement pour permettre à l'animal d'y vivre et dont on augmente ou abaisse très lentement la température. On observe alors que, pour le poisson comme pour tout être vivant, existe une température limite au delà de laquelle il lui est impossible d'exister, soit du côté du chaud, soit du côté du froid, mais l'écart, variable d'ailleurs selon les espèces, est assez élevé; il est tel, pour les températures basses, que le poisson supporte d'être complètement pris dans la glace sans cesser de vivre, pourvu que l'expérience ne se prolonge pas trop longtemps. L'animal, dans un milieu très froid, peut-être même après complète congélation, tombe dans une torpeur, un sommeil d'où il se réveille avec toute sa vigueur aussitôt qu'on le place dans un milieu présentant des conditions plus favorables. D'une façon générale, les poissons tolèrent beaucoup mieux l'excès de froid que l'excès de chaud.

En revanche, le poisson ne supporte pas un changement brusque de température qui le tue d'une manière foudroyante. M. Regnard

le démontre par une très jolie expérience qui permet de transporter automatiquement et alternativement un poisson d'un bassin à une certaine température dans un autre bassin à une température différente. Lorsque l'écart est faible, l'animal souffre seulement du changement, certaines espèces plus que d'autres ; quand il est plus grand et atteint 5 degrés, surtout dans les températures hautes, entre 20 et 25 degrés, quelle que soit son espèce, l'animal meurt immédiatement.

Si, en possession de ces lois, on observe la nature, on constate que tous les faits en sont l'application rigoureuse.

Chaque espèce ayant une température optimum, il y aura des animaux de mers chaudes et des animaux de mers froides. Le développement des coraux est limité à la température minima de 20 degrés, observation due à Dana et d'une haute importance géographique et géologique.

Les poissons préférant les températures froides aux températures chaudes, les mers froides sont plus poissonneuses que les mers chaudes. On citerait comme exemples les morues si abondantes sur les bancs de Terre-Neuve, les harengs, les sardines, les thons des mers froides et tempérées, les parages particulièrement poissonneux des Canaries dans les îlots d'eaux plus froides qui, par un mécanisme qu'il y aura lieu d'expliquer, se rencontrent au milieu même des eaux chaudes de cette région. Dans les pays chauds, pendant la nuit, les poissons viennent à la surface, tandis que pendant le jour, alors que le soleil échauffe les eaux superficielles, les poissons les abandonnent, cherchant l'ombre et la fraîcheur des rochers, ou se réfugient dans les profondeurs. On a remarqué qu'au milieu des récifs de coraux où, à travers l'eau limpide, l'œil distingue jusqu'à d'incroyables profondeurs, on n'aperçoit pas de poissons pendant le jour, tandis que la nuit, la masse liquide est sillonnée d'éclairs phosphorescents qui se succèdent sans interruption et que laissent dans leur sillage les multitudes de poissons alors sortis de leurs abris. Comme au sein de l'océan, les couches froides descendent de plus en plus bas à mesure qu'on passe des régions polaires aux régions tropicales, il en résulte que

le climat de la mer supérieure polaire équivaut à celui de la mer profonde des régions tropicales et les mêmes espèces d'animaux se trouvent de plus en plus profondément à mesure qu'on se rapproche davantage de l'équateur.

Un autre fait trouve son explication dans les expériences précédentes. Lorsque, dans les expéditions océanographiques, on remonte des poissons des grandes profondeurs, ils viennent à la surface en très mauvais état. Non seulement ils sont morts mais leur estomac fait hernie hors de la bouche, leurs écailles sont en partie détachées, leurs yeux sont sortis de la tête. On avait attribué ces effets à la décompression subie par l'animal passant rapidement d'une pression de plusieurs centaines d'atmosphères à la simple pression atmosphérique. Certes, un tel changement ne saurait être sans action, mais l'effet principal est le changement brusque de température. Le prince de Monaco a observé que tandis que les poissons abyssaux qu'il pêchait dans l'Atlantique où la température est très différente au fond et à la surface, étaient tous morts, ceux pris aux mêmes profondeurs dans la Méditerranée où la température des grands fonds est régulièrement de 13 degrés environ et par conséquent diffère très peu de celle de la surface, parvenaient à bord en si bonnes conditions qu'il était possible de les conserver vivants pendant plusieurs jours.

Enfin le résultat foudroyant d'un changement brusque de température explique un fait d'une importance extrême dans l'industrie des pêches : le cantonnement des faunes dans l'océan, alors qu'aucune barrière matérielle ne semble exister pour arrêter leurs migrations. En réalité, ces barrières existent, constituées par des séries de couches d'eau variant beaucoup de température sur une faible épaisseur. On se rappelle du Gulf-Stream reconnu par les baleiniers, parce que, soit du côté du nord, soit du côté du sud, il est une barrière infranchissable pour les baleines. Mais ces animaux étant des cétacés, mammifères à sang chaud, l'exemple n'est pas topique. Ceux relatifs à de vrais poissons ne manquent pas. Au nord des Hébrides, comme une sorte de chaussée sous-marine reliant l'Écosse à l'Islande, s'allonge vers le nord-ouest, la crête

Wyville Thomson dont le sommet se dresse jusque vers 450 à 500 mètres au-dessous de la surface, tandis que de chaque côté de sa largeur variant de 10 à 16 kilomètres, les fonds descendent au delà de 1 100 mètres. Le Gulf-Stream frappe cette barrière du côté du sud-ouest, ses eaux chaudes superficielles seules la franchissent, tandis que ses eaux profondes avec une température de 6,5 degrés, sont arrêtées comme par une digue. Sur le flanc opposé s'appuie le bassin polaire avec des eaux qui, à la même profondeur de 1 100 mètres, ont la température de — 1 degré. Il en résulte à peu près au niveau de la crête, sur une faible épaisseur, une succession très rapide de couches à des températures passant brusquement de + 1 à + 7 degrés. Cette mince nappe est une limite infranchissable. Au sud-ouest de la crête vit une faune atlantique, au nord-est une faune polaire complètement différente et toutes deux, malgré leur voisinage, ne se confondent jamais.

Combien d'autres faits s'éclairent tout d'un coup d'une vive lumière par ces lois si simples et pourtant si précises, si indiscutables parce qu'elles sont basées non sur des opinions personnelles, mais sur des nombres expérimentaux dont elles ont l'irrésistible rigueur. Ainsi s'explique par exemple, dans le présent comme dans le passé de l'histoire de la terre, l'agglomération de poissons plus particulièrement reconnue dans les eaux froides voisines d'eaux chaudes amenées par les courants. Celles-ci se refroidissant rapidement causent la mort ou l'affaiblissement d'une infinité d'êtres vivants entraînés et qui, devenant une proie facile pour les poissons cantonnés dans les régions froides inférieures, profitent de cette aubaine. Ces phénomènes sont connus à Terre-Neuve, sur les côtes de Norvège et ailleurs. Au point de vue de la géologie on expliquerait encore d'une façon analogue l'abondance de poissons fossiles dans certaines localités où se sont sans doute accomplis, alors qu'elles étaient sous les eaux, des événements du genre de ceux qui viennent d'être mentionnés.

Une conséquence pratique en découle immédiatement : le thermomètre devient un véritable outil de pêche. Après que des études préliminaires auront été faites d'abord par des océanographes, puis

par des zoologistes, que les conditions thermiques et autres particulières à tel ou tel poisson, à telle ou telle période de son existence auront été déterminées rigoureusement, le pêcheur cessant de perdre son temps en travaillant au hasard, attendant que « ça morde » ainsi qu'on l'entend dire si souvent à Terre-Neuve et en Islande, commencera par sonder thermométriquement. Il aura bientôt fait de connaître le régime de la mer au-dessus de laquelle il flotte et saura alors d'avance à quelle profondeur il doit descendre ses lignes. L'examen si facile des autres conditions océanographiques lui indiquera si la pêche doit être particulièrement abondante ; le thermomètre lui montrera les zones à exploiter, les filons riches de ces sortes de mines. Telle est la méthode employée en Angleterre, en Norvège, en Suède, en Allemagne, aux États-Unis, au cap de Bonne-Espérance, au Japon. Qui donc, en France, aura la voix assez puissante, la parole assez persuasive pour être entendu et pour convaincre, pour faire comprendre à nos pêcheurs si pauvres, si vaillants, si dignes d'intérêt et plus encore, de respect, car ils possèdent les plus nobles vertus, que les savants ont travaillé et que pour eux, à peu près seuls, sauf les indigènes de la Papouasie, il est enfin temps de ne plus pêcher comme on le faisait sous le règne du roi Clovis.

CHAPITRE VIII

L'OPTIQUE. LA COMPRESSIBILITÉ. LA DENSITÉ LA SALINITÉ DE LA MER

Scoresby rapporte qu'un navigateur anglais du nom de Wood, en 1676, à la Nouvelle-Zemble, avait été frappé de ce fait que, par 80 brasses, il avait pu distinguer des coquillages sur le fond. Ce chiffre de 80 brasses semble exagéré ; il provient sans doute d'une erreur de copie et peut-être conviendrait-il mieux d'entendre seulement 80 pieds, c'est-à-dire 25 mètres. Telle serait la première observation citée relative à l'optique de la mer. Ce serait exagérer quelque peu son mérite que de donner le nom de mesure à une pareille remarque déjà faite sans doute bien avant Wood, car depuis que des hommes vivent au bord de la mer, ils ont certainement observé que la profondeur à laquelle on aperçoit le fond varie selon le lieu et le moment. De là à une préoccupation scientifique il y a loin et l'on aurait tort de considérer Wood comme le créateur de l'étude optique de la mer.

Il en est autrement de Marsigli, qui fut un initiateur en optique comme il l'a été en tant d'autres branches de l'océanographie. En 1707, pour prendre la date de la publication de son *Histoire physique de la mer*, sûrement postérieure à celle de ses observations, il affirma que « l'eau de mer possède une couleur naturelle claire et plus brillante qu'aucune autre sorte d'eau de fontaine ou de citerne » et des couleurs accidentelles ou, comme il les appelle d'un mot très juste, « supposées », et qui sont attribuables à des causes multiples.

La première est le trouble apporté par les fleuves, les rivières et les torrents qui distribuent leurs eaux en nappes plus ou moins vastes et dont le vent modifie à l'infini l'étendue, l'épaisseur et, par conséquent, la coloration. Il faut y joindre le tribut des eaux douces jaillissant du sol sous-marin après avoir suivi un cours souterrain. Marsigli leur accordait une importance bien méconnue après lui et qu'on recommence à leur attribuer de nos jours.

Les colorations dépendent encore « des réflexions et des réfractions des rayons du soleil causées par les nuages ou par le fond de la mer, ou bien par la brisure de sa figure naturelle et ordinaire contre les corps solides qu'elle heurte ». Marsigli détaille chacune de ces causes ; il remarque les effets des fonds de sable ou de gravier, d'algues ou de vase, les nuances combinées produites par la nature différente du fond et l'état de l'atmosphère. Il se borne à attacher à un hameçon « des poissons de couleur rouge appelés *sarans* » et cela lui suffit pour noter qu'il ne commence à les apercevoir qu'à la profondeur de 7 brasses et, qu'au-dessus du sable, leur couleur passe au blanc. Dans d'autres conditions, la limite de leur visibilité atteint 11 brasses. Il observe enfin les irisations produites par les embruns, la blancheur due à la rencontre des rochers en hauts-fonds, ou des plages sablonneuses aisément agitées par les vagues.

Les principes de l'optique de la mer sont donc posés avec cette étonnante sagacité et cet esprit d'analyse si dignes d'être admirés chez Marsigli. Il ne reste plus qu'à les vérifier expérimentalement et à exécuter des mesures. C'est ce dont s'occupera Bouguer dans la zone équatoriale pendant le voyage qu'il accomplit de 1735 à 1740 dans l'Amérique du Sud et au Croisic.

Le célèbre académicien remarque que dans les mers tropicales, il aperçoit des fonds de sable blanc jusque par 100 et 150 pieds (30-40 mètres) de profondeur. Il installe des expériences à la suite desquelles il reconnaît qu'une épaisseur de 10 pieds d'eau affaiblit la lumière dans le rapport de 5 à 3 et que 656 pieds de profondeur, soit 213 mètres, constituent la limite extrême à laquelle la lumière est susceptible de pénétrer.

Muncke, au XVIIIe siècle, à bord d'un navire appelé la *Coquille*, envoie en divers points du Pacifique un écran blanc dans la mer et il prend pour mesure de la transparence la distance à laquelle on la perd de vue. Les mêmes expériences sont répétées par Kotzebue en 1817 qui emploie en outre des écrans rouges; par Wilkes en 1838-1842; puis en 1845 par le contre-amiral Bérard, alors commandant le *Rhin* qui se sert d'une simple assiette en porcelaine.

Les expériences systématiques ne furent commencées qu'en 1865 par le P. Secchi et le commandant Cialdi, à bord de l'*Immacolata-Concezione*, de la marine pontificale, en Méditerranée. Leur travail est des plus complets ; il est répété plutôt que continué par Luksch et Wolff en 1880, dans l'Adriatique et la mer Ionienne, le commandant Ascherborn de la *Niobe* en 1887 et 1888, dans la mer Baltique et la mer du Nord, par Krümmel pendant l'expédition du *Plankton* dans la mer des Sargasses et de nouveau par Luksch pendant les campagnes de la *Pola* dans la Méditerranée orientale et la mer Rouge.

Il n'y avait jusque-là que des mesures sur place ; la question avait besoin d'être étudiée scientifiquement dans chacun de ses éléments. Quand la lumière blanche traverse la mer, il y a péné tration de divers genres de rayons dont l'ensemble constitue le spectre : rayons thermiques et ensuite rayons lumineux proprement dits et rayons actiniques agissant chimiquement. Ces deux dernières espèces de rayons devaient avoir leurs lois élucidées isolément. Le Dr F.-A. Forel de Morges aborda le premier l'examen des rayons chimiques dans le Léman, en 1873. Après lui, les observateurs se multiplient : Asper en 1881 dans le lac de Zurich ; Spindler et Wrangel dans la mer Noire ; la commission nommée par la Société de Physique de Genève ; Fol et Sarazin en Méditerranée et Luksch sur la *Pola*. L'absorption lumineuse faisait d'autre part l'objet des recherches de Vogel et de Huefner, tandis que le Dr Regnard exécutait toute une série d'expériences applicables à la biologie, c'est-à-dire aux effets de la lumière sur les végétaux et les animaux. L'historique de l'optique de la mer est

loin d'être complet ; de nombreux noms sont omis qu'on retrouvera en partie dans la suite de ce travail.

On sait que la lumière est un mouvement vibratoire s'effectuant dans tous les azimuts perpendiculairement à la direction du rayon lumineux — et alors elle est dite naturelle — ou bien dans un plan unique et dans ce cas elle est polarisée. La lumière du soleil est blanche ; par son passage à travers un prisme, elle est déviée ou réfractée et décomposée en un spectre de diverses couleurs commençant par le rouge qui est le moins réfracté, se continuant par l'orange, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo pour finir par le violet qui est le plus fortement réfracté. Ce spectre est en outre coupé de raies noires verticales appelées raies de Frauenhofer dont la position est fixe et qui servent de repères. Dans une lumière on distingue l'intensité et la couleur, celle-ci dépendant de la longueur de l'onde. Le rouge possède une grande longueur d'onde, tandis que le violet en a une courte; les autres couleurs ont des ondes de dimensions intermédiaires augmentant régulièrement du rouge au violet.

Les raies de Frauenhofer prouvent que le spectre est discontinu. En revanche, son étendue dépasse de beaucoup les limites de la visibilité. Il est réellement infini dans un sens et dans l'autre. Tout dans la nature n'est que vibration et selon que celle-ci augmente ou diminue, elle devient plus particulièrement perceptible à l'un de nos organes. Très lente comme celle d'une corde secouée par l'une de ses extrémités, elle est visible à notre œil; plus rapide, l'œil la perçoit encore, mais mal ; en revanche notre oreille l'apprécie et la nomme un son, de plus en plus aigu à mesure qu'elle est plus rapide. Plus rapide encore, invisible, imperceptible à l'oreille, elle est ressentie par notre corps tout entier sous forme de chaleur ; plus rapide, elle est lumière rouge, puis jaune, puis violette et alors son éclat s'affaiblissant jusqu'à s'éteindre, nous devenons incapables de la distinguer ; plus rien de notre corps ne se doute de sa présence et pourtant cet éther, cette matière hypothétique que nous ne connaissons qu'à ses effets, vibre sans cesse plus rapide. L'onde noircit le chlorure d'argent, impressionne les

plaques photographigues, les rayons sont actiniques. Qui sait jusqu'où s'étend le spectre? Les rayons découverts par Röntgen viennent y prendre place puis ceux de M. Blondlot. Nos sens sont des instruments récepteurs ayant chacun leur sensibilité bornée entre des limites distinctes du spectre. Qui peut affirmer que ces limites déjà légèrement variables d'un homme à un autre homme, ne le soient pas bien davantage parmi les animaux? Certains êtres doivent voir des sons ou entendre des odeurs, ou sentir des harmonies de lumière. A l'aide de quelles vibrations s'entendent entre elles les fourmis ou les abeilles? L'esprit demeure confondu au milieu de cet immense concert de la nature où tout se mêle, aussi admirable par son effroyable complication d'effets que par sa majestueuse simplicité de cause.

Dans l'étude de l'optique de la mer, nous examinerons successivement l'absorption de la lumière dans l'eau, les rayons chimiques dont le rôle est si grand dans la répartition de la vie, faune et flore au fond des eaux, et enfin la couleur de la mer.

La plus simple façon de se rendre compte de l'effet que produit la lumière au sein des eaux consiste à y descendre en scaphandre et, après s'être enfoncé d'une dizaine de mètres, à regarder le ciel au-dessus de soi. L'expérience a été faite par Hermann Fol. A mesure qu'on descend, l'intensité lumineuse décroît rapidement; on aperçoit un vaste cercle lumineux, aux bords rendus ondoyants aux moindres mouvements des flots, passant de la pleine lumière à l'obscurité et qui sous-tend, dans l'œil de l'observateur, un angle de 62° 50′ environ. Le phénomène s'explique par la réfraction que subissent les rayons lumineux en passant de l'air dans l'eau et inversement de l'eau dans l'air ainsi que par la réflexion totale. Lorsque le soleil se rapproche de l'horizon et que ses rayons s'inclinent sous l'angle de la réflexion totale, ils cessent de pénétrer dans les eaux, ils sont réfléchis et il en résulte que la durée de l'éclairement est notablement plus courte dans l'eau que dans l'atmosphère. Pour le scaphandrier, le crépuscule succède brusquement au grand jour et Fol raconte qu'il lui est souvent arrivé, croyant la nuit venue, de sortir de l'eau et de se voir alors

avec surprise, subitement inondé par les rayons d'un soleil encore assez haut dans le ciel.

Le procédé du disque blanc permet de se renseigner sur la distance d'absorption lumineuse à travers l'eau. On prend un disque métallique de 30 centimètres de diamètre, peint à la céruse pure, au-dessous duquel est suspendu un plomb et qui, à l'aide d'une patte d'oie, se rattache à une cordelette graduée de mètre en mètre. On envoie à l'eau en ayant soin de se placer du côté de l'ombre portée par le bateau ; souvent même on se protège contre la lumière diffuse en s'enveloppant la tête d'un voile noir ou simplement en s'abritant avec une ombrelle. On laisse descendre jusqu'au moment où l'on cesse d'apercevoir le disque et alors on le remonte jusqu'à ce qu'il réapparaisse. Après quelques tâtonnements, on parvient à noter à quelques centimètres près, la longueur de cordelette filée qui servira de mesure à la transparence.

J'ai cherché par des expériences synthétiques à simplifier les conditions du problème et à rendre à la fois plus pratiques et plus précises les mesures à la mer ou dans des lacs. Ces expériences montrent que la relation reliant entre elles la distance de disparition ou transparence y, évaluée en dixièmes de millimètre, d'une source lumineuse examinée à travers de l'eau contenant x grammes par litre de kaolin, argile blanche en poudre impalpable est représentée par $xy = \mathrm{E}$. La valeur constante E dépend de l'intensité de la source lumineuse et diverses considérations m'ont conduit à choisir pour elles le chiffre 40 et à adopter par conséquent la relation $x = \frac{40}{y}$. J'ai été également amené à remplacer le disque par une boule creuse en cuivre de 15 centimètres de diamètre, peinte en blanc et qu'on descend dans l'eau jusqu'à ce qu'elle disparaisse. On observe non pas à l'œil nu, mais avec une lunette d'eau, instrument dont il sera parlé plus loin et dont le P. Secchi avait d'ailleurs déjà recommandé l'emploi. Entre autres avantages sur le disque, la boule est susceptible de se lester à volonté en y introduisant des balles de plomb et de servir ainsi non seulement à des mesures optiques et par suite à des dosages de sédiments en suspension, mais encore à l'étude des courants. La

dimension de la boule et l'intensité d'éclairement n'exercent, dans les conditions ordinaires, qu'une influence pratiquement négligeable. Un exemple fera mieux comprendre. Luksch ayant constaté par un grand nombre de mesures que la transparence moyenne de la Méditerranée orientale était de 33 mètres, les données précédentes autoriseraient à conclure que la teneur moyenne des eaux de cette mer en sédiments est de 12 centièmes de milligramme par litre environ.

Ces mesures sont faciles à prendre ; elles montrent que la transparence est extrêmement variable en divers lieux et, au même endroit, à des moments différents. Comme le poisson se prend d'autant mieux que l'eau est moins transparente, soit qu'il aperçoive moins bien les filets ou que l'eau plus trouble contenant une nourriture plus abondante, il se rassemble alors plus nombreux, dans les pays où l'industrie des pêches est basée sur des méthodes scientifiques et en particulier en Écosse, il est recommandé aux pêcheurs d'exécuter fréquemment la mesure de la transparence de la mer et de la noter sur les carnets d'observations dont ils sont munis. Ces indications totalisées servent à dresser des tableaux empiriques à l'aide desquels on parvient à évaluer les conditions générales de la pêche dans la région étudiée et à résoudre plusieurs autres problèmes d'océanographie.

En définitive, le procédé est celui qu'avaient employé les premiers observateurs de la transparence de la mer. Kotzebue, dans le Pacifique, avait vu disparaître le disque vers 45 mètres, le contre-amiral Bérard, aux Wallis, par 40 mètres, Krümmel dans la mer des Sargasses par 66,5 m. Luksch à 33 mètres en Méditerranée orientale, un peu moins bas dans la mer Égée et encore moins bas dans la mer Rouge, Forel, dans le Léman, par 6,6 m. en été et 12,7 m. en hiver. Dans ce dernier cas la température a fait indirectement sentir son influence sur la quantité des particules solides en suspension.

Les expériences du commandant Cialdi et du P. Secchi avec le disque blanc, ont permis de noter l'influence des diverses variables que comportent les conditions du problème dans la mer. Plus

le disque est grand et plus grande sera la profondeur à laquelle on l'apercevra; cependant il existe une limite rapidement atteinte au delà de laquelle la surface devient sans influence. La distance de vision augmentera si l'observateur se trouve à l'ombre, parce que sa vue sera protégée contre les effets de la lumière réfléchie à la surface de l'eau et dont l'éclat dissimule la lumière beaucoup plus faible renvoyée par le disque. Elle sera d'autant plus grande que l'observateur se trouvera plus près de la surface de l'eau et que le soleil sera plus haut sur l'horizon, bien que cette influence soit assez faible, enfin que le ciel sera plus serein. Toutes ces influences seront supprimées par l'emploi de la lunette d'eau. Luksch a repris ces expériences et tracé les courbes de ces différentes variables. La limite dépendra beaucoup de l'état d'agitation de la mer et de la profondeur de l'eau, car dans les profondeurs faibles ou moyennes, les vagues remuent les particules vaseuses et les ramènent jusque vers la surface.

Une variable reste à étudier : l'influence de la couleur. Elle avait été effleurée par Marsigli avec ses sarans rouges accrochés à l'hameçon, par Kotzebue avec ses écrans rouges; elle a été reprise par Secchi et Cialdi qui immergèrent et mesurèrent la distance de disparition de disques jaunes et « couleur de vase », c'est-à-dire probablement bleu verdâtre et, quelques années après en 1880, par Wolff et Luksch, à bord de la *Hertha* qui prirent des disques de diverses couleurs, mates et brillants et qui, à l'aide d'un appareil spécial, apprécièrent le moment où le disque était réduit à ne plus offrir que le dixième de l'intensité lumineuse qu'il aurait possédée dans l'air. La conclusion de toutes ces recherches fut la même. Le disque blanc restait visible le plus profondément; la limite de visibilité était minimum avec les disques rouges. On en conclut que l'eau absorbe surtout les rayons rouges.

Aitken et ensuite Forel eurent l'idée d'observer l'eau non plus verticalement mais horizontalement au moyen d'un miroir incliné à 45 degrés fixé à l'extrémité d'un tube noirci intérieurement et que, par conséquent, on n'immergeait que dans la couche tout à fait superficielle. A la vérité, il s'agissait bien moins dans ce cas

de mesurer l'absorption lumineuse de l'eau que de juger de sa coloration. Le procédé est excellent et rend de grands services en se combinant avec une échelle de coloration, il est comparable à lui-même et garantit l'observateur contre un grand nombre de variables accessoires. Cependant on remarquera que malgré tous ces travaux, la question soit d'absorption, soit de coloration n'avait encore été étudiée qu'empiriquement et avec une précision relative; il était temps de l'aborder d'une façon plus rigoureuse et vraiment scientifique.

Les premières expériences sont dues à Spring en 1883. Après avoir distillé de l'eau avec des précautions infinies afin d'être assuré de sa pureté, il en remplit un tube de verre long de 5 mètres et noirci intérieurement, il y fit passer un rayon lumineux blanc dont il recevait l'image sur un écran. Il reconnut ainsi que l'eau possédait une couleur qui lui était propre — « le plus beau bleu du ciel tel qu'on peut le voir par une belle journée quand on se trouve au sommet d'une montagne élevée au-dessus des émanations grossières du sol peut seul lui être comparé ». Or, si l'eau est bleue, elle absorbe les rayons rouges et jaunes de la lumière solaire. L'absorption, ainsi que l'ont vérifié ensuite MM. Soret et Sarazin, diminue avec la réfrangibilité des rayons lumineux, c'est-à-dire en décroissant du rouge au violet, de sorte que sous une épaisseur suffisante l'eau paraîtrait, par transparence, absolument noire. A travers 180 centimètres d'eau, 50 pour 100 du rouge sont absorbés et seulement 5 pour 100 de l'indigo. L'absorption s'effectue en progression géométrique dont la raison est différente suivant la réfrangibilité des rayons lorsque l'épaisseur d'eau varie en progression arithmétique. Enfin elle n'est pas continue, car le spectre d'absorption présente des bandes obscures dans l'orangé et même dans le vert et dans le bleu, conclusions confirmées par les observations spectroscopiques de M. Vogel dans la grotte d'Azur, près de Capri, éclairée en bleu du plus féerique aspect, parce que la lumière n'y pénètre qu'après avoir traversé une couche d'eau de mer qui en ferme presque complètement l'entrée. Comme un corps offre à l'œil qui le considère la couleur qu'il n'a pas absorbée, on s'ex-

plique pourquoi l'eau pure des mers et des lacs paraît bleue.

Il était facile, en procédant avec le même mode opératoire, d'apprécier, en opérant à des températures différentes, l'action de la chaleur sur l'absorption. On a reconnu ainsi que plus l'eau est chaude et plus elle absorbe de lumière. Cette absorption est d'environ deux rayons sur mille pour 1 degré d'élévation de température. Néanmoins tous les observateurs sont d'accord sur ce fait que les mers froides sont moins transparentes que les mers chaudes. Cette contradiction apparente s'explique par la limpidité beaucoup plus grande des eaux chaudes attribuable à deux causes. En premier lieu on sait que les eaux froides sont notablement plus peuplées de vie que les eaux chaudes. Le plankton y est plus abondant et sa présence augmente évidemment l'opacité de l'eau, c'est-à-dire sa faculté d'absorption. En second lieu les eaux polaires moins profondes, plus fréquemment et plus fortement remuées par les vagues, sont plus chargées en sédiments solides et ceux-ci se déposent plus rapidement dans une eau chaude que dans une eau froide. Les chimistes ayant à recueillir un précipité très léger, de l'oxalate de chaux, par exemple, ne manquent pas de laisser le dépôt s'effectuer dans un endroit chaud. Forel a observé l'absorption lumineuse dans le lac de Genève en y plongeant un disque blanc de 25 centimètres de diamètre, il a reconnu, au contraire, que sa limite de disparition était de 5 m. 3 au mois d'août, de 15 m. 4 en mars, la moyenne étant de 6 m. 6 en été et de 12 m. 7 en hiver; jamais elle n'a dépassé 27 mètres.

Les particules en suspension, considérées indépendamment de leur couleur propre, ne se bornent pas à augmenter matériellement l'opacité de l'eau. Par absorption directe, les rayons des diverses couleurs sont éteints d'après l'ordre décroissant de leur longueur d'onde, c'est-à-dire des rayons rouges à grande longueur, aux rayons violets à courte longueur. Les particules très ténues reçoivent seules ces derniers rayons; elles les réfléchissent et les diffusent, ce qui vient encore accroître la dominante bleue de la nuance sous laquelle apparaît l'eau à un observateur voguant à sa surface. Au contraire, pour un observateur immergé, à mesure

qu'il s'enfoncerait davantage, l'eau passerait successivement au vert jaunâtre clair, au vert sombre foncé, puis au noir. La Manche, entre le Cotentin et la mer du Nord, très chargée des particules de craie qu'elle détache des falaises normandes et anglaises qui bordent ses rivages, offre une nuance laiteuse, opaque, verdâtre qui est celle de la turquoise, tandis qu'entre le Cotentin et l'Atlantique, le long des côtes de Bretagne, ses eaux plus limpides ressemblent à de l'émeraude.

La quantité de sel dissoute ou salinité possède encore une influence. Le rouge y est peu sensible mais l'indigo est d'autant plus absorbé que l'eau est plus salée.

En 1883, la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève chargea une commission composée de MM. Plantamour, Soret, de la Rive, de Candolle, Sarazin, Fol, Pictet, Rilliet et Ch. Soret, de faire des recherches sur la transparence du Léman pendant la nuit. On procéda en immergeant des lampes électriques, des bougies, des lampes à huile de colorations diverses tantôt verticalement, à des profondeurs différentes, tantôt horizontalement à des distances plus ou moins éloignées. On les observait depuis la surface au moyen d'un tube noirci terminé par un miroir à 45 degrés qu'on plongeait dans l'eau et on mesurait la distance d'apparition et de disparition des diverses lumières. On constata que la lumière diffuse se propage à une distance approximativement double de celle à laquelle on cesse d'apercevoir nettement le point lumineux. Ces distances varient avec l'état de limpidité de l'eau, c'est-à-dire avec la saison ; la limite de visibilité nette augmente avec l'intensité de la lumière quoique bien moins rapidement que cette dernière, avec la concentration, à l'aide d'une lentille, des rayons émanant du foyer, enfin elle augmente du rouge au violet. Le maximum de distance obtenu avec une lampe électrique a été de 38 m. 5 pour la vision nette et de 82 m. 8 pour la lumière diffuse. On a estimé qu'à 40 mètres de profondeur, avec plein jour au dehors, un homme se trouverait dans l'obscurité complète. Dans la mer Noire, MM. Spindler et Wrangell ont repris ces recherches et reconnu qu'une lampe électrique de 8 bougies disparaissait à 77 mètres.

Au total, la distance à laquelle on voit dans la mer est extraordinairement restreinte. Là est le grand obstacle — sans parler de beaucoup d'autres — à la navigation sous-marine. Les adversaires des sous-marins prétendent qu'ils risquent de n'être jamais que des quasi-aveugles même si à force de science on parvient à les faire cesser d'être de quasi-paralytiques. Les poissons eux-mêmes distinguent très mal. Hermann Fol l'a reconnu d'une façon assez originale. Il avait fait pratiquer dans la carène du yacht à bord duquel il voyageait et étudiait, en Méditerranée, une ouverture hermétiquement fermée par un verre très transparent et très épais et, dans l'obscurité, derrière ce hublot, il observait le fond qui prenait alors une transparence extraordinaire. Il remarqua que lorsqu'un petit poisson était poursuivi par un gros, il fuyait avec une extrême vitesse à courte distance et alors s'arrêtait, certain d'être devenu absolument invisible à son ennemi. Dans ces conditions, d'accord avec les données expérimentales précises mentionnées ci-dessus, il est plus que douteux que l'homme parvienne jamais à voir loin dans la mer.

C'est également ce motif qui rend illusoires les avantages de photographies prises au sein des eaux, à supposer même qu'on descende des foyers de lumière électrique aussi puissants qu'on le voudra. Quoiqu'on fasse, le champ demeurera extraordinairement restreint, de sorte qu'une photographie du fond ne montrera rien de plus et beaucoup de choses en moins, quant au sol lui-même, qu'un simple échantillon ramené à la surface par n'importe quel procédé.

Il serait très important de pouvoir, de la surface de la mer, distinguer le fond à une distance aussi grande que possible. Un instrument capable de donner ce résultat rendrait des services aussi bien à la topographie et à la lithologie sous-marines qu'à une foule d'autres opérations d'océanographie militaire ou industrielle. A diverses reprises on a annoncé la découverte de combinaisons de miroirs propres à faciliter ces investigations et qui probablement n'ont pas tenu ce qu'on en attendait, car le silence s'est fait autour d'elles. Jusqu'à présent, l'unique appareil extrêmement simple

employé depuis de longues années est la lunette d'eau, que les marins désignent quelquefois sous le nom de lunette du maître calfat. Il sert beaucoup aux pêcheurs norvégiens. Il consiste en un tube de zinc on de fer-blanc cylindrique ou présentant une forme évasée ressemblant un peu à celle d'un porte-voix et dont la base la plus large est fermée par un verre à vitres fixé au mastic hydrofuge de manière à demeurer bien étanche. On enfonce cette extrémité à quelques centimètres dans l'eau et on regarde par l'autre. Les petites rides de la surface sont ainsi supprimées et l'on aperçoit le fond, pourvu qu'il ne soit pas trop éloigné, comme si l'eau était absolument calme. La portée de la vue est ainsi considérablement étendue quoiqu'elle reste évidemment assez variable selon la limpidité de l'eau.

La plupart des expériences décrites précédemment ont été reprises par le Dr Regnard qui en a mesuré les divers éléments au moyen de procédés remarquablement ingénieux. Il s'est proposé, tout d'abord, de chercher jusqu'à quelle profondeur, dans la mer, se rencontrent des conditions de durée et d'intensité du jour à peu près comparables à celles dont on jouit au fond de l'espèce d'océan gazeux qui constitue notre atmosphère ou, en d'autres termes, à quelle heure commence le jour dans telle ou telle couche de la mer habitée par des animaux et des végétaux. L'expérience a été exécutée en rade de Funchal, à Madère, en 1889. Un cylindre métallique horizontal est percé suivant une génératrice, d'une fente fermée par une glace derrière laquelle passe un papier sensible mu par un mouvement d'horlogerie qui lui fait accomplir un tour en vingt-quatre heures. Le cylindre, d'après une méthode fréquemment employée par le Dr Regnard, est en communication avec un ballon compensateur en caoutchouc rempli d'air, grâce à la compression duquel, quelle que soit la profondeur, la pression extérieure supportée par le cylindre et sa pression intérieure demeurent constamment égales. On prend deux instruments identiques, l'un est laissé exposé au jour sur le pont, le second est descendu à une profondeur connue, la fente étant, bien entendu, tournée vers le haut, On abandonne pendant une journée; les deux bandes de papier

impressionnées sont alors retirées, développées et fixées simultanément puis comparées. On constate alors qu'à quelques mètres de profondeur à peine, ainsi qu'il était à prévoir, en conséquence de la réflexion totale, la durée de l'éclairement est déjà diminuée de plusieurs heures chaque jour.

Pour mesurer en chiffres l'absorption de la lumière par l'eau, c'est-à-dire sa diminution d'intensité avec la profondeur, le Dr Regnard a employé une pile au sélénium dont la résistance électrique diminue proportionnellement à l'éclairement. Un galvanomètre installé à terre permettait d'effectuer les mesures. L'expérience faite à Monaco, à peu de distance du rivage, a servi à tracer la courbe des résultats obtenus.

Enfin pour évaluer le décroissement avec la profondeur de la quantité de lumière frappant la surface de l'eau, le Dr Regnard a utilisé la propriété que possède un mélange d'hydrogène et de chlore dans la proportion exacte de 1 volume du premier pour 1 volume du second, de se combiner pour former de l'acide chlorhydrique proportionnellement à la quantité de lumière reçue. On remplit du mélange gazeux une série de tubes de verre gradués revêtus d'un vernis noir opaque soluble dans l'eau. On immerge ces tubes les uns au-dessus des autres à des distances connues; le vernis se dissout, la combinaison des gaz s'effectue, on remonte pendant la nuit, on ouvre chacun des tubes sur la cuve à eau et on mesure l'absorption. Toutes ces expériences représentées par des courbes montrent que dès les premiers mètres il se fait une grande absorption, puis la lumière diffuse produite par la réflexion sur les mille petits corps en suspension donne une lueur faible mais presque égale qui règne ensuite jusqu'à une certaine profondeur.

On a vu que le spectre solaire contenait en outre des rayons calorifiques et lumineux, des rayons actiniques doués d'une puissance chimique se traduisant par la décomposition de certains sels et en particulier de ceux d'argent. Il était d'autant plus intéressant de mesurer le mode et la distance de propagation au sein des eaux de ces rayons chimiques qu'ils ont une influence prépondé-

rante sur la végétation et par elle sur la distribution générale des êtres vivants dont une partie, les herbivores, se repaissent directement des herbes croissant sur le fond et dont l'autre partie, les carnivores, fait sa proie des herbivores. La distribution de la faune et de la flore est donc sous la dépendance absolue de la distribution de la lumière actinique qui seule permet la formation de la chlorophylle, l'assimilation de l'acide carbonique et par conséquent la vie végétale.

Les premières expériences sont dues à Forel qui, par une nuit obscure, immergea dans le Léman des tubes de verre hermétiquement scellés contenant du chlorure d'argent récemment préparé dans l'obscurité et par conséquent parfaitement blanc. Il laissait ces tubes exposés pendant une journée entière à des profondeurs connues, les retirait pendant la nuit suivante et les comparait entre eux. En opérant ainsi, il reconnut qu'au delà de 45 mètres, le noircissement du chlorure d'argent n'avait plus lieu et que, par suite, cette distance fixait la limite de pénétration des rayons actiniques.

Asper renouvela cette expérience dans le lac de Zurich en se servant de plaques photographiques au gélatino-bromure et vit qu'après vingt-quatre heures d'exposition, entre 150 et 160 mètres, elles cessaient d'être impressionnées. La limite de pénétration des rayons actiniques était reculée d'autant.

L'emploi de plaques photographiques était une heureuse innovation non pas toutefois exempte de critiques. Les plaques des divers fabricants ne jouissent pas toutes d'une sensibilité identique : les unes sont très sensibles, les autres le sont moins. Il n'existe donc pas entre elles d'uniformité et il en résulte que des expériences faites en diverses localités avec des plaques différentes ne sont pas rigoureusement comparables. En second lieu, on ne saurait en rien déduire de la limite observée d'impressionnabilité photographique, des conclusions sur la limite de visibilité aussi bien pour l'homme que pour les animaux. Non seulement on ignore la sensibilité relative à l'éclairement des yeux humains et de ceux des animaux, mais la sensibilité d'une plaque photographique elle-même,

n'est en rien comparable à celle d'un œil humain, à ne s'en tenir qu'à ce dernier. La meilleure preuve à en donner est que dans le cabinet noir éclairé à la lumière rouge et jaune, le photographe y voit suffisamment pour effectuer ses manipulations, tandis que la plaque photographique demeure absolument insensible. Avec ces restrictions, les expériences faites au moyen de plaques sont intéressantes; elles ont été répétées en un grand nombre d'endroits différents, dans des lacs d'eau douce et dans la mer par de nombreux physiciens, à l'aide d'instruments divers tous basés sur le même principe. Un châssis contenant une plaque photographique est descendu fermé à la profondeur voulue; il est ouvert par un messager envoyé de la surface et la plaque demeure exposée à la lumière. Après un temps déterminé, un second messager ferme le châssis qui est alors remonté. On développe, on fixe et on évalue l'intensité de l'impression par comparaison.

Hermann Fol et Sarazin descendirent des plaques dans le Léman et, à la suite de leurs expériences, admirent qu'à 170 mètres, l'éclairement ou, pour mieux dire, l'action actinique était égale à celle d'une nuit obscure, sans lune. Dans la Méditerranée, à 400 mètres ou, au plus, à 500 mètres, par beau soleil, au milieu du jour, les plaques ne se voilent plus. Ces mêmes savants, à l'aide du même mode opératoire, étudièrent les diverses influences de l'heure, du temps, de la saison, de la limpidité et autres. Des expériences du même genre ont encore été faites par Luksch et par Karl Chun.

La radiation lumineuse la plus nécessaire à la formation de la chlorophylle indispensable à la vie végétale est le rouge. Les rayons bleus favorisent au contraire l'oxydation, c'est-à-dire la destruction de la matière organique. Le rouge étant rapidement absorbé par l'eau, il en résulte que les plantes ne pourront pas vivre très profondément. Comme Paul Bert a prouvé que dans le phénomène de la végétation, la lumière agit non par sa quantité, mais par le nombre de ses vibrations, dans cette zone restreinte, les algues ne verdiront qu'aux profondeurs où pénétreront les radiations rouges. Des expériences ont montré que la limite est d'environ 30 mètres. Or, certaines de ces plantes produisent des pigments

bleus et rouges qui, lorsqu'ils s'ajoutent à la chlorophylle qui est verte, leur donnent un aspect plus ou moins brun. Les algues bleues envoyant à l'œil des rayons de cette couleur absorbent donc les rayons rouges. Pour la même raison les algues vertes, puis les brunes et enfin les rouges absorbent les rayons de plus en plus violets. L'absorption dans l'eau des vibrations lumineuses se faisant du rouge au violet, les algues des diverses couleurs seront disposées par zones superposées : à partir de la surface, les bleues, ensuite les vertes, puis les brunes comme les fucus et les laminaires, et enfin les rouges ou floridées.

Au delà d'une certaine profondeur réglée par la limite extrême d'assimilation, à environ 400 mètres, plus ou moins modifiée localement par les influences du sol, de la température, du mouvement des eaux, de leur limpidité, la végétation cesse. Néanmoins, pour prolonger cette zone d'existence, la nature se sert de la fluorescence. Le Dr Regnard a démontré expérimentalement son influence. La fluorescence provient en partie des algues elles-mêmes dont beaucoup d'espèces contiennent une matière colorante rouge, la phycoérythrine, qui jouit de la propriété d'absorber les rayons de faible longueur d'onde comme le bleu et de les transformer en rayons rouges à grande longueur d'onde. Il pourra dès lors se former de la chlorophylle, l'acide carbonique sera décomposé et assimilé et, en définitive, la végétation existera. Le même effet résultera de la phosphorescence manifestée par des animaux des profondeurs.

Les botanistes ont constaté que pour chaque espèce d'algue il y avait un maximum, un optimum et un minimum d'intensité lumineuse actinique. Ainsi s'explique l'abondance différente d'une année à l'autre de telle ou telle espèce d'algue très probablement due au nombre des jours de soleil ou couverts si variable aussi d'une année à l'autre. Les plantes manifestent en outre, les unes un héliotropisme positif, c'est-à-dire cherchent la lumière, les autres un héliotropisme négatif, c'est-à-dire fuient la lumière et se cachent sous les rochers.

L'influence de la lumière est non moins considérable sur les

animaux que sur les végétaux. Par une insolation plus ou moins forte, la rapidité d'éclosion des œufs est modifiée d'environ un tiers pour les seiches sur lesquelles ont porté les expériences. Les animaux herbivores restent par conséquent cantonnés dans la zone de végétation, c'est-à-dire la zone diaphane. Mais parmi eux se manifestent aussi des phénomènes d'héliotropisme et la plupart possèdent un optimum d'intensité lumineuse. Leur héliotropisme est tantôt positif comme chez les coraux et tantôt négatif. Beaucoup de coquillages disparaissent pendant le jour et ne se promènent que la nuit. Il en est de même du plankton dont les continuelles migrations en profondeur sont surtout sous l'influence de la diversité d'éclairement. Il s'enfonce le jour et remonte à la surface pendant l'obscurité. Enfin l'héliotropisme est quelquefois double de telle sorte que certains animaux recherchent la lumière faible et fuient la lumière forte. Des crustacés tenus dans l'obscurité courent d'abord vers la lumière forte, mais dès qu'ils en sont pour ainsi dire saturés, ils la fuient et retournent à l'obscurité. Ces considérations sont d'un intérêt considérable pour l'industrie des pêches.

La lumière possède une action sur la coloration de la peau des animaux et le développement des pigments est corrélatif de l'intensité lumineuse. L'influence s'exerce sur tout ce qui peuple le milieu, animaux et végétaux. C'est ainsi qu'on est amené à cette si curieuse propriété de la mimésie par laquelle les habitants d'un même milieu assortissent leur coloration et qui est un si puissant moyen de protection dans la série animale. Les animaux de haute mer sont transparents ou d'un blanc argenté ce qui les dissimule aux recherches de leurs ennemis, la faune des algues floridées est rouge ou brune, les crustacés et les coquillages vivant parmi les polypiers des atolls, ont la coloration du corail mort. Il en est de même sur la terre ferme et au sein des océans. Certains poissons, crustacés et céphalopodes, y sont tellement sensibles qu'ils changent presque instantanément de couleur. Le résultat est attribuable à des contractions éprouvées par des cellules contractiles de diverses couleurs appelées chromatophores qui sont sous l'influence de l'œil de l'animal, car on supprime instantanément en lui la faculté

d'adaptation en l'aveuglant. Cette adaptation a lieu plus rapidement chez les jeunes que chez les vieux. Cependant beaucoup d'animaux d'abîmes sont brillamment colorés surtout dans les tons pourpres, rouges et orangés, grâce aux phénomènes de la phosphorescence qui est très riche en rayons verts. On remarquera que le pourpre étant complémentaire du vert, il en résulte encore une protection pour l'animal ayant cette couleur qui par contraste, paraît sombre et échappe ainsi à ses ennemis.

A la surface des eaux, il semble que, à part les poissons, les êtres aquatiques ne voient que la forme et la couleur des corps. Dans les abîmes où ne pénètre pas la lumière du jour, on trouve des animaux aveugles par suite d'une atrophie des organes de la vision et d'autres qui sont munis d'yeux. Or, ces derniers doivent évidemment voir. La faune des cavernes qui sont absolument obscures est toujours privée d'yeux. Il est probable que les animaux abyssaux aveugles doivent vivre dans la vase tout comme les taupes qui, à la surface même du sol, demeurent continuellement dans l'obscurité et ne possèdent que des yeux rudimentaires. La remarque n'est pas sans importance en paléozoologie, car une espèce aveugle loin de prouver un habitat profond indique seulement un habitat sombre, de même que la craie ancienne démontre l'existence, à l'endroit de son dépôt, non pas de grandes profondeurs mais d'un grand calme des eaux. Chez les espèces privées de vue, les organes de vision sont suppléés le plus souvent par d'autres organes tels, par exemple, que des tentacules. L'atrophie des yeux s'expliquerait encore par une migration de l'espèce de la surface vers la profondeur, cependant comme l'hypothèse laisse prise à des objections, la question ne saurait être considérée comme résolue. Walther suggère que les formes abyssales voyantes sont sans doute nektoniques tandis que les aveugles sont benthiques.

La phosphorescence à elle seule justifierait la présence des yeux. Presque tous les habitants des profondeurs émettent des lueurs très perceptibles à l'œil humain et probablement plus perceptibles aux organes plus sensibles des animaux abyssaux. Déjà à la surface même de la mer, les noctiluques, des bactéries, des

méduses, des pennatules et d'autres êtres encore sont phosphorescents. Les lueurs colorées qui inondent les abîmes doivent être d'une incroyable beauté. Cependant il doit être nécessaire d'être habitué à ce mode d'éclairement. Si un poisson de surface, dit le Dr Regnard, était subitement entraîné dans les ténèbres relatives du fond, il y succomberait faute d'être en état de poursuivre sa proie et de s'en emparer. Leurs habitants ordinaires en profitent et en même temps ils y contribuent par la lueur qui s'échappe sans cesse de leur corps entier ou bien rayonne d'organes spéciaux régulièrement distribués par points alignés le long du corps, de plaques étalées sur la tête ou portées à l'extrémité de tentacules. Les bactéries qui adhèrent aux animaux morts ou vivants flottent dans l'eau ou recouvrent le fond d'une couche continue et le transforment peut-être en une nappe de lumière. M. de Folin a donné une frappante description du spectacle auquel il eut l'heureuse fortune d'assister, à bord du *Talisman*, à la suite d'un coup de drague qui revint chargé d'animaux phosphorescents.

« Un soir que le chalut avait été mouillé assez tard par une assez grande profondeur, comme il ne pouvait rentrer à bord que le lendemain matin de bonne heure, chacun était allé dans son lit en attendant le retour de l'instrument. Il eut lieu vers trois heures, par un temps fort obscur; remontés sur le pont assez à temps pour le voir paraître à la surface de l'eau, il nous fut facile de reconnaître qu'il montrait de nombreuses lueurs : cette particularité n'inspira d'abord que peu d'intérêt; la mer présentant souvent les mêmes effets lorsque quelque frottement ou quelque choc l'agitent.

« Mais combien la surprise fut grande lorsqu'on put retirer du filet un grand nombre de Gorgonidés ayant le port d'un arbuste et que ceux-ci jetèrent des éclats de lumière qui firent pâlir les vingt fanaux de combat qui devaient éclairer les recherches et avaient pour ainsi dire cessé de luire aussitôt que les polypiers se trouvèrent en leur présence.

« Cet effet inattendu produisit d'abord une sorte de stupéfaction qui fut générale, puis on porta quelques spécimens dans le labo-

ratoire où les lumières furent éteintes. Dans l'obscurité profonde de cette pièce, ce fut pour un instant de la magie. Nous eûmes sous les yeux le plus merveilleux spectacle qu'il soit donné à l'homme d'admirer. De tous les points des tiges principales et des branches du polypier s'élançaient par jets des faisceaux de feux dont les éclats s'atténuaient puis se ravivaient pour passer du violet au pourpre, du rouge à l'orangé, du bleuâtre à différents tons de vert, parfois au blanc du fer surchauffé. Cependant la couleur bien dominante était sensiblement la verte ; les autres n'apparaissaient que par éclairs et se fondaient rapidement avec elle. Si pour aider à se rendre quelque peu compte de ce qui nous charmait, je dis que tout ceci était bien autrement beau que les plus belles pièces d'artifice, on n'aura encore qu'une bien faible idée de l'effet produit et pourtant je ne puis rien trouver d'autre pour comparer le phénomène. D'une extrémité à l'autre du laboratoire, à une distance de plus de six mètres, nous pouvions lire comme en plein jour les caractères les plus fins d'un journal.

« Le phénomène n'eut pas une longue durée.

« La vie s'éteignait peu à peu chez ces animaux, la vivacité des éclats diminuait à chaque minute, les feux s'en allaient mourant avec l'organisme. Au bout d'un quart d'heure, leur pâleur dernière disparaissait elle-même pour ne laisser au polypier que l'aspect morne et sombre d'une branche desséchée. »

La phosphorescence du plankton explique les phénomènes si connus désignés sous le nom de phosphorescence de la mer et qui n'appartiennent en rien à l'eau elle-même mais aux êtres vivants qui y flottent. C'est encore à la présence d'animaux qu'est due la mer de lait, fréquemment observée dans l'océan Indien et qui donne à la surface de l'eau l'aspect d'une vaste plaine de neige éclairée d'un reflet crépusculaire.

La couleur sous laquelle la mer frappe l'œil d'un observateur est la résultante d'une multitude d'actions. Pour la constituer telle qu'elle est aperçue, entrent les variables qui viennent d'être étudiées et particulièrement l'absorption lumineuse. Puisque l'eau absorbe les rayons rouges plus que les rayons bleus, il est évident qu'elle

doit paraître bleue par réflexion, car la lumière réfléchie est la portion de lumière blanche qui n'ayant pas été absorbée est renvoyée à l'observateur. Les particules infiniment fines tenues en suspension et qui diffusent la lumière à courte longueur d'onde, c'est-à-dire le bleu, augmentent encore l'effet produit. Il convient d'y joindre, pour les eaux peu profondes, la couleur du fond qui transparaît à travers la couche liquide relativement mince qui la recouvre. Un fond de sable blanc, des herbiers verts ou brun foncé, des vases plus ou moins bleuâtres modifieront diversement la nuance. Dans chaque cas, l'état de calme ou d'agitation des flots introduira une variable, parce que les vagues troubleront le fond et feront remonter jusqu'à la surface les sédiments terreux. Le commandant Cialdi attribuait à cette influence une importance considérable. Si une mer reçoit la décharge d'un vaste fleuve aux eaux troublées et colorées par des particules d'une nuance spéciale, sa coloration se modifiera en conséquence et elle sera affectée par les différences de saison qui changeront la nuance du fleuve et le volume de son débit. L'Amazone et le Congo qui charrient des boues rouges, rougissent l'Atlantique jusqu'à une assez grande distance de la côte, les eaux jaunes chargées de lœss du Hoang-Ho communiquent à la mer Jaune la couleur qui lui a valu son nom. La question relève plus du simple bon sens que de la science véritable.

On a attribué à la quantité variable de sel dissous une influence sur la coloration de la mer. L'hypothèse est assez peu plausible et l'on a peine à croire que des variations de salinité aussi faibles que celles qui sont constatées produisent des différences de nuances aussi grandes que celles que présente l'océan. On en dirait autant de la température. Il est plus probable que la véritable cause est la proportion de plankton végétal et animal qui est en relation étroite avec la salure et la température. Cette influence, toute naturelle, est considérable. Les diatomées donnent la nuance vert olive fréquente dans les eaux polaires; d'autres algues communiquent une couleur rouge sang. Ce phénomène est fréquent dans la mer Rouge et il a peut-être valu à celle-ci sòn nom, à moins que

la mer Érythrée ne soit celle qui baigne les rivages habités par « les hommes au teint rouge » des auteurs anciens. Au voisinage du cap Horn, l'océan est souvent sillonné de larges et longues bandes rouge brun ondulant au loin sur les vagues et qui sont dues à des quantités immenses d'un très petit crustacé. Des navires ont rencontré de vastes espaces d'eaux rendues jaunes par une pluie de pollen amenée par des vents soufflant de terre. Les matières organiques en dissolution colorent l'eau en vert ainsi qu'on le reconnaît pour beaucoup de lacs de montagnes. Plusieurs mers portent des noms de couleurs : la mer Vermeille en Californie, la mer Rouge, la mer Jaune dont l'origine a été indiquée. La mer Blanche serait en réalité la mer Sainte à cause du célèbre couvent construit près d'Arkhangel et qui est un lieu de pèlerinage très fréquenté, tandis que la mer Noire, l'ancien Pont-Euxin ou mieux Axin, devrait son nom aussi bien en langue russe qu'en langue turque, non à sa couleur qui ne diffère pas sensiblement de celle des autres mers, ni à ses tempêtes qui ne sont ni plus ni moins terribles que les autres, mais à l'inhospitalité de ses bords aux côtes dépourvues d'abris, sans phares, permettant aux navires de s'approcher de la terre et de s'y refugier en cas de besoin. On pourrait presque dire que, pour ces deux mers, il s'agit plutôt de couleurs morales que de couleurs physiques.

Il serait utile de pouvoir désigner d'une façon précise telle ou telle coloration de la mer. C'est le problème de la notation des couleurs qui depuis si longtemps exerce la sagacité des chercheurs. Malheureusement les résultats obtenus jusqu'ici sont médiocrement satisfaisants. Forel a imaginé une gamme de teintes qui, malgré des inconvénients sur lesquels il faut bien passer, faute de mieux, constitue encore l'instrument qui répond le moins mal au but proposé. On prépare deux solutions, l'une bleue, l'eau céleste des pharmaciens, en dissolvant 1 gramme de sulfate de cuivre dans 9 grammes d'ammoniaque et 190 grammes d'eau distillée, et l'autre jaune en dissolvant 1 gramme de chromate de potasse dans 199 grammes d'eau. On mélange ensuite en proportions diverses ces deux liqueurs types qui donnent toute une série de verts dont chacun

LE CHALUT EST PRÊT A ÊTRE ENVOYÉ SUR LE FOND

LE CHALUT DESCEND

est distingué par la proportion de liqueur jaune contenue. Ainsi par exemple un mélange de 2 volumes de liqueur jaune et 8 volumes de bleu portera le numéro 2 ; la solution type bleue aura le numéro 0 et la solution type jaune le numéro 10. Les liqueurs sont enfermées dans des tubes en verre blanc transparent, scellés à la lampe, rangés les uns à côté des autres par degrés aussi serrés qu'on le voudra dans un cadre en bois. On observe la mer et on identifie sa coloration à celle d'un des tubes de la série dont on prend le numéro.

Il importe de ne pas se faire d'illusion. Pour un observateur placé à la surface de l'eau, la coloration de la mer n'existe réellement pas ; elle dépend de trop de causes : couleur propre de l'eau qui est bleue, absorption lumineuse et réflexion, finesse et quantité des particules en suspension, diffusion, nature et quantité des matières dissoutes, intensité de la lumière, nébulosité et coloration du ciel, hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, température et salure, état d'agitation, direction du mouvement des vagues par rapport à l'observateur ; nature, dimensions et quantité des matières minérales ou végétales grossières en suspension et qui proviennent de la nature géologique du fond ; de la profondeur, de la force, de la durée et de la direction de l'agitation superficielle, de la présence d'animaux en relation avec les conditions de température, de salure, d'éclairement, de courants ; de la profondeur variable à laquelle ils s'enfoncent sous l'influence des plus légères modifications éprouvées par la mer et par l'atmosphère. Comment tenir compte de tant de variables dont certaines affectent non seulement le point observé mais encore le point particulier d'où est faite l'observation, de sorte que, s'il était possible à un même observateur d'examiner en même temps de deux points différents, le même espace de mer, il ne le noterait pas de la même façon ?

Un seul procédé semble de nature à fournir les renseignements les plus exempts des variables accessoires, celui d'Aitken et de Forel qui ont fait usage d'un miroir à 45 degrés immergé à très faible distance dans l'eau et montrant la coloration de celle-ci sur une tranche en quelque sorte infinie, immédiatement au-dessous de

la surface. Dans ces conditions, la comparaison avec une gamme de Forel, perfectionnée si possible, fixerait pour des eaux différentes, les chiffres les plus comparables entre eux. La méthode serait cependant encore imparfaite, parce que l'intensité même de la lumière resterait non évaluée et il serait encore difficile de comparer exactement deux teintes l'une plus sombre que l'autre. Je me suis livré à quelques expériences en mer avec le miroir à 45 degrés. J'ai constaté d'abord son excellent fonctionnement et ensuite la variété extrême des teintes vertes de l'eau selon la localité. Pour les apprécier et les noter, l'échelle de Forel, telle qu'elle est, est insuffisante. Il faudrait la rendre en quelque sorte plus précise, plus sensible et capable d'indiquer les diverses intensités d'une même nuance. J'ai dans ce but construit une lunette au moyen de deux prismes colorés l'un en bleu l'autre en jaune, de la même teinte que les liqueurs types de Forel. Ces prismes dont l'intensité de coloration passe de zéro au maximum, sont gradués par rapport à l'échelle de Forel. On les amène devant une fente et on y fait varier à volonté la proportion de rouge et celle de jaune, de sorte qu'il suffit alors de mesurer sur une échelle l'épaisseur de chaque prisme en face de la fente, pour obtenir le rapport de ces épaisseurs, c'est-à-dire la teinte exacte de l'eau de mer vue dans le miroir à 45°.

Pour en terminer avec ce qui concerne l'optique des eaux, nous parlerons rapidement de l'indice de réfraction de l'eau et de la polarisation de la lumière réfléchie par la mer, propriété sur lesquelles on s'est appuyé pour imaginer deux instruments à l'aide desquels on espérait résoudre plusieurs problèmes d'une haute utilité pratique.

L'indice de réfraction d'un milieu est le rapport existant entre les vitesses respectives de la lumière au sein de ce milieu et dans l'air. Cette donnée se mesure sur une faible quantité de matière, en l'espèce, pour l'eau de mer, sur quelques grammes et l'opération s'exécute, quand on possède l'instrument approprié, avec rapidité et précision. Comme l'indice de réfraction de l'eau de mer est en relation avec la quantité des sels dissous et par conséquent avec la

densité, variable d'une grande importance pratique parce qu'elle permet d'étudier la circulation océanique, on a pensé que la mesure de la densité par l'indice de réfraction serait avantageuse. Hilgard, de l' « U. S. Coast Survey », a eu cette pensée et a fondé sur elle une méthode. Malheureusement l'indice de réfraction est fortement modifié par la température qu'on n'est jamais assuré de maintenir constante sur une aussi petite quantité de liquide, ni même de pouvoir exactement évaluer. Or, il faut connaître la densité de l'eau à une température fixe, zéro par exemple, et en l'adoptant on serait amené à de sérieuses complications expérimentales, surtout à bord d'un navire, et à la température qu'avait l'eau en place dans les profondeurs de la mer. On y parviendrait il est vrai au moyen de corrections, mais par suite des faibles quantités de matière sur lesquelles on opère, de la difficulté de connaître la température expérimentale exacte, les corrections devraient subir des corrections elles-mêmes d'une précision douteuse. La rigueur du résultat final, quel que soit le nombre des décimales qui le représente, est donc illusoire. Or un résultat erroné est d'autant plus dangereux qu'il est représenté par plus de décimales, car on est porté à y avoir confiance et l'on est ainsi conduit inconsciemment à d'énormes erreurs. C'est un résultat hypocrite contre lequel on ne saurait trop se tenir en garde. La méthode de Hilgard n'est plus employée et son abandon est justifié.

Un autre instrument a beaucoup fait parler de lui autrefois, le polariscope qui devait servir à signaler les écueils à simple vue. Arago qui l'avait imaginé s'était appuyé sur le principe suivant. En lumière réfléchie, la mer est bleue, en lumière transmise elle est verte. En mer profonde où aucune lumière n'est transmise, l'eau est franchement bleue, tandis qu'en mer peu profonde, sur un haut-fond, la lumière est en partie réfléchie et en partie transmise par le fond lui-même qui, à travers la couche d'eau peu épaisse qui le recouvre, envoie à l'œil de l'observateur la lumière qui lui est d'abord parvenue de haut en bas depuis la surface et qui a accompli ensuite un second parcours de bas en haut à travers l'eau. Cette dernière offrira alors une nuance générale bleue avec

mélange d'un peu de vert. L'œil aveuglé par la masse de la lumière totale est hors d'état de faire la part de l'une ou de l'autre et voit tout en bleu. Mais la lumière bleue réfléchie étant en partie polarisée en conséquence même de sa réflexion, peut être éteinte au moyen d'un analyseur, nicol ou autre, disposé de façon à ce que sa section principale soit perpendiculaire au plan de vibration des rayons polarisés. La lumière verte, non polarisée, n'éprouve aucun changement et devient par suite perceptible. Il en résulte que regardé à travers l'instrument, un haut-fond isolé dont l'emplacement serait invisible à l'œil nu, se détacherait en vert sur un fond sombre s'il était examiné à travers un analyseur. L'hypothèse des deux colorations de la mer est inexacte, l'instrument ne donne donc pas le résultat espéré. Les phénomènes naturels s'accomplissent rarement avec la rigueur théorique, de multiples causes accessoires viennent les troubler et le polariscope d'Arago est tombé dans l'oubli.

La compressibilité est la propriété que manifestent les corps d'occuper un volume moindre lorsqu'ils sont soumis à une compression. On appelle coefficient de compressibilité la diminution que subit l'unité de volume du corps pour l'unité de compression. Aimé songea le premier à mesurer cette caractéristique de l'eau de mer.

Frappé des nombreuses causes d'inexactitude que présentaient les méthodes employées pour des mesures analogues en 1761 par John Canton, ensuite par Perkins et Œrstedt et plus tard encore par Sturm et Colladon, ainsi que des dangers qu'elles font courir à l'expérimentateur, Aimé, afin d'obtenir les coefficients de compressibilité de divers liquides, eut l'idée ingénieuse de tirer parti de la mer, machine à compression naturelle qui permet d'évaluer avec précision les pressions et d'étendre très loin leurs limites.

A l'air libre, au niveau de la mer, la hauteur barométrique normale de 76 centimètres de mercure, soit en poids 1 034 grammes si le tube barométrique possède une section de 1 centimètre, représente la pression que supporte chaque centimètre carré de surface. Cette pression, tant qu'on ne quitte pas les continents et quelle que

soit l'altitude à laquelle on s'élève, ne subit que des variations presque insignifiantes puisqu'il faut plus de 100 mètres de différence de niveau pour que la colonne barométrique s'abaisse de 1 centimètre. Or les plus hautes montagnes du globe n'atteignent pas 9 000 mètres.

Mais si l'air ne pèse que 1 gr. 3 par litre, l'eau des mers sous le même volume, pèse environ 1 gr. 026, c'est-à-dire plus de 1 kilogramme et le mercure 13 kilogr. 6. Il en résulte, en prenant les chiffres ronds, que par chaque profondeur de 10 mètres, chaque centimètre superficiel d'un corps immergé supporte une pression de 1 atmosphère supplémentaire. Les profondeurs de la mer dépassant 9 000 mètres, sous une telle colonne d'eau, il supportera par centimètre carré de surface, 900 atmosphères soit 900 kilogrammes. Des pressions aussi formidables agiront mécaniquement et physiquement sur l'eau, chimiquement sur les phénomènes d'ordre chimique et biologiquement sur les êtres vivants.

Aimé se servit pour ses expériences d'une sorte de thermomètre ouvert et deux fois recourbé sur lui-même. Dans le réservoir il enfermait le liquide à étudier et remplissait le tube avec du mercure qui, lorsque l'appareil était descendu dans la mer, se comprimait et se déversait en partie par une pointe effilée dans le réservoir où il restait désormais emprisonné. Il suffisait de connaître le poids de mercure déversé, la température et la profondeur donnant la pression subie ainsi que quelques autres variables, toutes mesurables, pour évaluer la compressibilité du liquide et en calculer le coefficient. Aimé opéra sur l'eau de mer, l'eau douce, l'alcool, les acides acétique, oxalique, sulfurique, chlorhydrique et l'ammoniaque. Il établit expérimentalement les lois de la compressibilité jusqu'à 220 atmosphères, grâce à des immersions dans la mer à 2 200 mètres de profondeur au bout d'un fil de sonde.

La compression est proportionnelle à la pression ; le coefficient de compressibilité augmente quand sa température s'élève et diminue à mesure que s'accroît la quantité des sels en dissolution.

Aimé appliqua le même procédé aux gaz qu'il chercha à com-

primer jusqu'à leur liquéfaction. Reprenant ceux qui avaient résisté à Faraday, il réussit avant 1845, à liquéfier l'hydrogène bicarboné, le bioxyde d'azote et l'oxyde de carbone ; il échoua pour l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. Comme application pratique de ces lois, il conseilla dans tous les sondages, afin d'éviter l'inconvénient qui résulte de la courbure prise par la ligne de sonde sous l'action, des courants et qui fausse par excès les évaluations de profondeur, de fixer près du plomb un de ces piézomètres rempli d'un liquide de coefficient de compressibilité connue. Les profondeurs seraient alors évaluées non plus par la longueur de ligne filée, mais d'après la compression subie par le liquide indiquant l'exacte distance verticale comprise entre le plomb et la surface de la mer.

Les mesures d'Aimé sur l'eau de mer furent reprises en 1851, en France par Wertheim et Grassi et, beaucoup plus tard, par M. M. Mohn de l'expédition du *Vöringen* et Buchanan de celle du *Challenger*.

Le coefficient de compressibilité de l'eau de mer est faible : 1 litre d'eau descendu à 1 mètre de la surface c'est-à-dire soumis à la pression de 1 mètre d'eau se comprime de 0,0000046614 environ. Cette correction ne laisse pas de devenir importante pour des profondeurs considérables et elle doit être absolument prise en considération s'il faut, par exemple, se rendre compte au moyen de la densité, du rôle dynamique que joue un litre d'eau pris en un point quelconque au sein de l'océan. Dans ce cas, il est indispensable, pour comparer entre eux deux échantillons différents et découvrir leur mouvement réciproque l'un vers l'autre, de les considérer tels qu'ils agissent en réalité en conséquence de la position même qu'ils occupent et des conditions dans lesquelles ils se trouvent, c'est-à-dire à leur température et à leur volume *in situ*, double variable qui vient modifier la valeur des densités telles qu'il est possible de les mesurer à la surface.

La compressibilité affecte la masse des eaux et non pas la quantité de gaz — en particulier l'air atmosphérique — qui s'y trouve en dissolution et qui reste toujours, quelle que soit la profondeur, à la simple pression d'une atmosphère. Le fait est de la plus extrême

importance en biologie, car il touche aux phénomènes de la respiration c'est-à-dire à l'existence même des êtres habitant les abîmes. L'animal supporte sur ses tissus l'énorme pression de 1 atmosphère par 10 mètres de profondeur, soit 100 kilogrammes environ par centimètre carré; il y est insensible parce qu'elle s'exerce aussi bien de l'intérieur de son corps à l'extérieur que de l'extérieur vers l'intérieur, et il s'établit un équilibre auquel il est d'ailleurs adapté, mais il respire toujours comme à la surface. Aimé admettait que l'eau est en quelque sorte poreuse et, depuis le haut jusqu'en bas, en continuelle communication avec la surface, c'est-à-dire avec l'atmosphère, par des canalicules infiniment fins. Pour mieux faire saisir la différence, il comparait la couche d'eau la plus profonde à la brique posée à la base d'un édifice qui supporte, il est vrai, dans sa masse la pression de tout le poids de l'édifice reposant sur elle quoique l'air y reste à la pression atmosphérique, parce qu'elle est poreuse et communique en toutes ses parties avec l'atmosphère par les milliers de petits canaux qui la sillonnent dans tous les sens.

La conséquence intéresse la pratique. Les premières bouteilles à recueillir l'eau de mer avaient été fabriquées avec des parois très épaisses dans le but de les rendre capables de résister aux énormes quantités d'air que l'on croyait dissoutes dans l'eau des grandes profondeurs et qui, l'appareil étant remonté fermé à la surface, pour éviter le mélange des eaux, devaient tendre à faire éclater la bouteille transformée ainsi en une sorte de projectile explosible. Il n'en est rien; Aimé l'avait reconnu. Le commandant Wille du *Vöringen*, afin de vérifier de nouveau la question, avait imaginé une bouteille métallique dans laquelle les gaz, s'ils se dégageaient à la suite de la cessation de pression, devaient se rendre dans un tube de verre très résistant et devenir ainsi visibles de l'extérieur. On n'aperçut rien. Plus tard, l'expérience fut encore une fois reprise par M. Richard et le fait de nouveau confirmé. Loin donc de forcer l'épaisseur des bouteilles ce qui les rend lourdes et par conséquent oblige à n'en attacher qu'une seule, deux au plus, sur un même fil de sonde, il faut les rendre aussi minces que possible

et, pour parer à la dilatation de l'eau contenue et provenant de la décompression, les munir au cas, assez rare d'ailleurs où elles seraient absolument étanches, en un point quelconque, d'un simple tube en caoutchouc susceptible de supporter la très faible dilatation indiquée par le coefficient de compressibilité de l'eau elle-même, soit 0,0000046614 par litre de liquide et par mètre de profondeur atteinte.

Cependant, dans les dragages profonds, lorsque les poissons sont remontés brusquement, ils se présentent généralement en assez triste état, les yeux hors de la tête, les écailles détachées, la vessie natatoire terriblement dilatée et faisant hernie hors de la bouche. L'effet est dû à la décompression rapide. Sans compter qu'à lui seul, nous le savons, le changement de température du froid du fond au chaud de la surface tue les poissons. Pour y obvier, les pêcheurs de Cuba qui vont au loin, avec des bateaux-viviers, pêcher à grande profondeur, ont soin dès que l'animal arrive tout distendu sur le pont, de se hâter de donner issue aux gaz en perçant la vessie natatoire d'un coup de poinçon. L'animal immédiatement rejeté dans le vivier du bateau, peut être ramené vivant au port.

Le Dr Regnard a étudié synthétiquement les effets de la pression sur les êtres vivants en continuant les expériences qu'avait exécutées Paul Bert et qui avaient amené celui-ci à reconnaître que dans l'air, la pression n'agit pas mécaniquement mais en changeant le milieu chimique où vivent les êtres, de sorte qu'elle influence puissamment les phénomènes de la vie. Regnard a démontré qu'il en était de même au sein des eaux.

Les expériences ont consisté à enfermer les êtres dans des tubes de verre à ouverture capillaire remplis d'eau et complètement immergés dans de l'eau contenue dans un épais manchon en acier fondu où l'on opérait une pression au moyen de la machine de Cailletet. La pression s'exerçant à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du tube, celui-ci ne courait aucun risque de rupture. Il a même réussi à observer d'une manière continue des animaux vivants en pratiquant dans le manchon métallique deux ouvertures en face

l'une de l'autre, bouchées par des glaces de Saint-Gobain très épaisses, polies et à faces plan-parallèles. En se plaçant dans l'obscurité et en faisant traverser le système par un faisceau lumineux, on peut projeter sur un écran et montrer à un nombreux auditoire les phases des phénomènes.

A 400 atmosphères, la levure de bière et une solution sucrée mises en présence, ne donnent pas de fermentation. Les bactéries unicellulaires demeurent en vie latente. Si par exemple des diatomées, par une cause quelconque, sont entraînées de la surface où elles vivent, dans les profondeurs et parviennent à 4 000 mètres, elles entreront en une sorte de sommeil. Si après peu de temps on supprime la compression, les êtres se réveillent et continuent leur évolution ; au cas où la compression se prolonge, ils périssent. Il en est évidemment de même dans l'océan. Dans l'appareil de Regnard, les matières animales n'entrent pas en putréfaction. Au fond de la mer les cadavres se conserveraient donc indéfiniment s'ils n'étaient pas dévorés par les animaux. Cependant des microbes spéciaux existent dans les profondeurs. On a abordé leur étude qui réserve de nombreuses surprises et est certainement appelée à devenir une branche très importante de l'océanographie. On a également introduit dans des tubes des ferments solubles tels que de la salive et du suc gastrique qui n'ont pas souffert de la pression et ont ainsi prouvé synthétiquement que la digestion s'accomplissait au fond des eaux comme à la surface.

Les infusoires et même des animaux d'ordre plus élevé manifestent des phénomènes identiques. Leurs tissus s'imbibent d'eau, ils entrent en vie latente ; la pression étant supprimée, s'il ne s'est pas écoulé trop de temps, l'eau en excès est éliminée, l'animal se réveille ; si la pression persiste, il meurt.

L'expérience est particulièrement intéressante sur des poissons. A 100 atmosphères, c'est-à-dire à 1 000 mètres de profondeur, on ne constate en eux qu'une excitation particulière ; à 200 atmosphères, l'animal est comme endormi ; à 300 atmosphères il commence à mourir ; à 400, il s'est produit du tétanisme et du coma ; le cadavre est rigide, gonflé, aussi dur que du bois. Dans l'océan, les pois-

sons de surface ne peuvent donc descendre que vers 2 500 ou 3 000 mètres. Au-dessous de 4 000 mètres habite la faune spéciale des abîmes.

On se rend aisément compte avec l'appareil, de la façon dont la pression agit sur les tissus musculaires et nerveux. L'eau les remplit, les gonfle et, à la décompression, n'ayant pas la possibilité de s'échapper, elle les dilacère. La compression trouble fortement aussi les phénomènes de la circulation ; le développement des embryons s'arrête entre 300 et 400 atmosphères, nouvelles preuves que la profondeur de 4 000 mètres est bien la limite séparant la faune superficielle de la faune abyssale.

En définitive, comme le dit Regnard, la pression comprime le protoplasma et comme il est plus compressible que les gaines conjonctives qui le renferment, il se retire laissant une partie de celles-ci vides. L'imbibition et l'endosmose, cette propriété qui règle le passage des liquides différents à travers les membranes animales, se combinent alors pour remplir d'eau ces gaines et remplacer le protoplasma absent. A la décompression, le plasma reprend son volume, mais l'eau n'a pas le temps de s'en aller ; le tissu semble donc gonflé et, en réalité, il a augmenté de poids.

Il nous reste à nous occuper d'une dernière propriété physique de l'eau de mer, son poids spécifique.

Le poids spécifique de l'eau de mer est le rapport entre le poids de l'unité de volume de cette eau et le poids du même volume d'eau distillée. Comme les corps changent de volume selon la température, il convient de fixer les températures de l'eau de mer et de l'eau distillée choisies pour opérer les mesures. Si pour cette dernière on adopte $+ 4°$, température de son maximum de densité, le poids spécifique porte le nom de densité et se rattache au système métrique. La température de l'eau de mer peut et doit être quelconque à la condition d'être spécifiée dans chaque cas. La densité est d'ordinaire figurée par le symbole S_4^t dont il est fait un fréquent usage en océanographie, car il représente la donnée essentielle permettant de se rendre compte de la circulation océanique.

La méthode la plus simple pour prendre une densité consiste à opérer à la température de 0°, celle de la glace fondante et qui pratiquement est d'une extrême commodité. Il n'est aucun physicien qui ne sache combien il est difficile d'entretenir une température rigoureusement constante autre que celle de 0°. On emploie la méthode du pycnomètre, vase en verre en forme de double réservoir réuni par un tube étroit portant un repère et bouché à l'émeri. On remplit le pycnomètre d'eau de mer, on ferme avec le bouchon, on place dans la glace, on établit la coïncidence exacte du liquide avec le trait d'affleurement en aspirant avec un tortillon de papier à filtre le liquide en excès. Dès que le niveau est devenu permanent, on pèse. On a préalablement exécuté la même opération avec de l'eau distillée en corrigeant le poids trouvé qui se rapporte à 0°, par le calcul, au moyen d'un coefficient connu permettant de le ramener à ce qu'il serait à + 4° ; on divise ces deux nombres l'un par l'autre et l'on obtient la densité S_4^0 qui est dite normale à zéro et qui varie avec les divers échantillons d'eaux.

La densité normale caractérise l'échantillon en soi, d'une façon statique, mais elle ne saurait servir directement à élucider le rôle dynamique que jouait cet échantillon au sein de l'Océan, à l'endroit où on l'a recueilli dans les conditions où il se trouvait au moment où il était actif et où il faut artificiellement le replacer. Il y possédait une température particulière θ qui a été soigneusement mesurée par un thermomètre attaché à la bouteille à l'instant de la récolte et, s'il a été pris dans la profondeur, un volume différent de celui qu'il présentait pendant qu'on mesurait sa densité puisqu'il était comprimé sous le poids d'une colonne d'eau correspondant à la profondeur. Cette dernière correction de compressibilité est facile à faire par le calcul, connaissant le coefficient de compressibilité. L'autre correction, un peu plus compliquée, oblige à se servir de tables préalablement dressées, ou mieux d'un graphique.

Pour établir le graphique, ce qui revient en définitive à chercher le coefficient de dilatation correspondant à chaque densité d'eau de mer, j'ai pris une série de densités d'un même échantillon à des températures différentes comprises entre les limites cons-

tatées dans l'océan, entre — 6° et + 35°, par exemple et j'ai tracé la courbe des résultats obtenus par rapport à deux axes de coordonnées rectangulaires sur l'un desquels sont comptées les densités et sur l'autre les températures. On recommence avec un autre échantillon d'eau ou, si on le préfère, avec le même, étendu d'eau distillée, ce qui diminue sa densité, ou concentré par évaporation, ce qui l'augmente. On couvre ainsi la feuille de papier où sont rapportés les résultats de nombreuses courbes entre lesquelles on trace par interpolation graphique les courbes définitives que, pour plus de régularité, on s'astreindra à faire passer à intervalles égaux et convenablement rapprochés d'une ligne verticale correspondant à une différence constante de densité à une même température.

Si on a obtenu expérimentalement la densité S_4^0 à zéro d'un échantillon quelconque, il sera aisé, au moyen du graphique, de la ramener à ce qu'elle serait à une température quelconque t. Pour cela, les densités étant, sur le graphique, comptées verticalement ou en ordonnées, et les températures en abscisses, sur l'ordonnée 0° et à la hauteur correspondant à la densité S_4^0, on marquera un point. On se reporte alors à l'ordonnée correspondant à t, on divise l'intervalle compris entre deux courbes successives proportionnellement aux intervalles indiqués par le point marqué sur l'ordonnée 0°. La hauteur verticale ainsi obtenue, lue sur l'axe des y ou des ordonnées, fournira la densité S_4^t. Dans le cas ordinaire, t sera la température *in situ* que possédait l'eau étudiée au sein de l'océan, au moment et à l'endroit où on l'a récoltée. On la désigne habituellement par la lettre θ de sorte que le symbole nS_4^θ après correction de la compression à n mètres de profondeur, représentera exactement la densité de l'eau *in situ* ou, en d'autres termes, le rapport entre le poids de l'eau à n mètres de profondeur et à la température θ et le poids du même volume d'eau distillée à la température de + 4° du maximum de densité de cette eau distillée.

Pour résumer, car on ne saurait trop insister sur ces données fondamentales, l'eau de mer est caractérisée statiquement par la

valeur du symbole S_4^0, densité normale et dynamiquement par le symbole nS_4^0, densité *in situ*. Dans le cas d'un échantillon de surface, il va de soi que la correction de compressibilité est supprimée.

La mesure d'une densité normale est une opération sinon compliquée du moins délicate exigeant des pesées précises qui ne saurait s'exécuter à bord d'un navire en cours de campagne. Sauf exceptions, le travail sur le terrain consiste à récolter les échantillons et celui du laboratoire à les étudier. On se borne à recueillir les échantillons en séries verticales et à intervalles aussi rapprochés que possible au moyen de bouteilles dont la plus commode est sans contredit celle imaginée par le Dr Richard à cause de sa grande légèreté qui permet d'en superposer plusieurs à intervalles connus sur un même fil de sonde. On se livre ensuite dans le laboratoire, à terre, avec toutes les précautions requises pour une donnée aussi importante, aux mesures et aux dosages que comporte une analyse complète d'eau. Cependant il est des cas où l'on se contente d'une précision un peu moindre à condition d'obtenir immédiatement un chiffre suffisamment approché ; on se sert alors d'un aréomètre. Marsigli avait deviné l'intérêt des mesures aréométriques de l'eau de mer ; il déclarait leur précision supérieure à celles fournies par la balance. Il avait même construit un instrument spécial et recueilli un certain nombre de données dans la région des côtes de Provence où il était obligé de se cantonner. Malheureusement, la chimie qui lui était indispensable n'était pas encore née. Il ne pouvait donc, comme tous ceux qui sont trop en avance sur leur temps, donner à ce qu'il apercevait de trop loin avec les yeux de son esprit, la rigueur qu'à si juste titre exige la science moderne. L'aréomètre le plus pratique et le plus précis employé aujourd'hui est celui dont s'est servi M. Buchanan à bord du *Challenger*.

L'aréomètre est essentiellement un flotteur qui enfonce plus ou moins dans le liquide où on l'immerge suivant que la densité de celui-ci est plus faible ou plus forte. Si on observe le niveau de la flottaison, il est facile de calculer la densité.

L'instrument de Buchanan est de la classe de ceux que l'on nomme à volume variable et à poids variable. Il consiste en un réservoir cylindrique en verre lesté à sa partie inférieure à la la façon ordinaire des pèse-acides, pèse-lait ou pèse-alcool, par une ampoule contenant du mercure et surmonté d'une tige creuse en verre, très fine, parfaitement cylindrique et portant une division en parties d'égale longueur qui sont en même temps d'égal volume. Au bout de la tige on emboîte un plateau léger en aluminium susceptible d'être chargé à volonté de poids supplémentaires. On a gradué à l'avance l'instrument de manière à connaître son poids total et son volume depuis le bas jusqu'au niveau de chacune des divisions de la tige. On verse l'eau à expérimenter dans une éprouvette et comme on est alors le plus souvent à bord, on suspend celle-ci par des cordelettes à un crochet fixé dans le plafond de la cabine et on laisse osciller librement au roulis et au tangage. On note la température au moyen d'un thermomètre gradué en dixièmes de degré; on remplace le thermomètre par l'aréomètre surmonté de son plateau dans lequel on a placé des poids en quantité suffisante pour que l'affleurement ait lieu le long de la tige. On lit la division à laquelle arrive le niveau de l'eau et on cherche dans la table d'étalonnage annexée à chaque instrument, en regard du numéro de la division, le volume immergé; on le corrige de la température indiquée par le thermomètre au moyen d'une table préalablement calculée, on note le poids total de l'instrument et des poids ajoutés en surcharge pour obliger l'affleurement à s'effectuer le long de la tige, on divise le second nombre par le premier et le quotient représente la densité de l'eau en expérience à la température de cette expérience. L'usage du graphique permettra d'ailleurs, en cas de besoin, de ramener cette densité à ce qu'elle serait à n'importe quelle autre température.

On a imaginé d'autres modèles d'aéromètres, les uns à poids invariable et volume variable, d'autres à immersion totale; on a adressé certaines critiques à l'instrument de Buchanan. Depuis vingt ans, j'ai beaucoup étudié la question, j'ai pris beaucoup de densités à la mer et dans le laboratoire et mon avis formel est

qu'à bord d'un navire, aucun ne lui est préférable et qu'en opérant convenablement, il fournit la densité de manière à permettre d'en affirmer la valeur avec une approximation de trois à quatre unités du cinquième ordre. On ne saurait exiger davantage et il ne reste qu'à souhaiter d'avoir plus de données prises avec cet instrument, car on aurait plus de lumières qu'on n'en possède sur la circulation océanique. Le seul désavantage réel est qu'il exige, pour fonctionner, un volume d'eau suffisant pour remplir l'éprouvette, c'est-à-dire relativement considérable, et ce motif empêche de l'employer pour mesurer des densités d'échantillons d'eaux en séries dont on ne possède jamais que de faibles volumes, 200 centimètres cubes environ pour lesquels on est forcé de prendre le pycnomètre. Fort de ma très longue pratique, je ne saurais trop recommander l'aréomètre de Buchanan.

Quel que soit l'état d'agitation de la mer, le système composé d'un flotteur en équilibre dans un liquide contenu dans une éprouvette oscillant librement, le niveau de la flottaison demeure absolument fixe. Je me suis appuyé sur cette remarque pour construire une balance destinée à peser de petites quantités de matière à bord d'un bâtiment. Cette balance est un aréomètre en métal pour être moins fragile, supportant un plateau à l'extrémité d'une tige fine munie d'un repère. On met en flottaison dans l'eau d'une éprouvette suspendue, on produit l'affleurement jusqu'au repère par l'addition de poids marqués. On retire les poids, on les remplace par le corps à peser et on ajoute des poids marqués de manière à reproduire l'affleurement. En retranchant la somme des poids dans la seconde expérience de la somme des poids dans la première, on a le poids du corps. Cette balance permet de peser rapidement jusqu'à 5 grammes de matière environ, avec une approximation de 5 milligrammes.

Il est bien entendu que l'eau dont on prendra la densité devra être limpide. L'expérience et la théorie sont d'accord pour montrer que, même mesurée à l'aréomètre, la densité d'une eau bourbeuse est plus élevée que celle de la même eau limpide.

Comme l'eau douce, l'eau salée possède un maximum de densité,

mais la température de ce maximum est variable ; elle s'abaisse à mesure que la proportion de sel augmente et plus rapidement que le point de congélation. L'abaissement du point de congélation au-dessous de 0° et l'abaissement de la température du maximum de densité au-dessous de + 4° sont presque en raison directe de la quantité de sel dissoute dans l'eau. Enfin la température du maximum de densité de l'eau de mer étant toujours inférieure à sa température de congélation, l'eau, quelle que soit d'ailleurs sa proportion de sels augmente de densité jusqu'au moment de sa congélation.

Ces lois dont l'étude commencée dès 1837 par Despretz, a été continuée par Weber, Rosetti, Zöppritz et d'autres physiciens, ont un intérêt capital au point de vue de la circulation océanique. Tous les phénomènes de circulation dans les régions polaires en sont l'étroite conséquence.

La densité de l'eau de mer est proportionnelle à la quantité de sels contenue. L'analyse d'un grand nombre d'échantillons d'eaux de provenances variées a permis d'établir approximativement cette relation. Il importe cependant de remarquer dès à présent, car ces faits seront repris à propos de la circulation océanique, que la relation, simplement approximative, n'offre aucun véritable intérêt scientifique, la densité et la masse totale de sels calculée ainsi n'étant en définitive qu'une seule et même caractéristique figurée par deux chiffres différents. Les zoologistes ont pris l'habitude de rapporter leurs études de biologie non à la densité mais à la salure qui, pour des esprits moins familiers avec la rigueur des sciences précises, parle davantage, plus immédiatement, en quelque sorte plus brutalement à la compréhension. Pour le physicien, le chiffre de la densité est préférable parce qu'il est le résultat immédiat de l'expérience, et celui de la salure, pour présenter un intérêt, devrait être obtenu directement. Or autant la mesure rigoureuse d'une densité est prompte et facile, autant celle de la quantité de sel contenue dans un échantillon est longue et délicate. Le physicien n'aura donc aucune hésitation dans son choix, sans compter que d'autres motifs que nous examinerons plus loin militent encore en faveur de l'adoption du chiffre de la densité.

L'eau de mer contient en moyenne environ 34 pour 1 000 en poids de sels. Cette proportion est variable entre de très grandes limites quant à la proportion totale des sels, et entre des limites plus resserrées mais non moins réelles quant à la proportion relative des divers sels constituant la masse totale. En un mot, l'eau de mer n'est point de l'eau distillée mélangée avec des proportions variables d'un même mélange de sels divers. On pourrait, tout au contraire, affirmer qu'il n'y a pour ainsi dire pas, dans l'étendue entière de l'océan, deux échantillons absolument identiques à ces deux points de vue.

Les animaux et les plantes varient selon les conditions de salure du milieu; entre la faune et la flore des eaux douces et celles des eaux les plus salées de l'océan et même des lacs désertiques tels que les lacs de l'Asie Centrale, le Grand Lac Salé et la mer Morte, se distribuent tous les êtres aquatiques. Le zoologiste s'applique à découvrir la corrélation existant entre ces variations et les types vivants, mais la rigueur de ses mesures, grâce à la faculté d'adaptation des êtres, est bien inférieure à celle imposée à l'océanographe qui veut expliquer divers phénomènes de l'océan et avant tout ceux de la circulation.

CHAPITRE IX

LES PÊCHES PROFONDES

L'ÉTUDE des animaux marins appartient au domaine de la zoologie et non à celui de l'océanographie; néanmoins les deux sciences se touchent de si près, ont entre elles tant de liens, se complètent et s'éclairent si souvent l'une l'autre qu'il est aussi difficile de présenter un exposé complet de l'océanographie sans dire quelques mots de la capture des animaux marins qu'il le serait de décrire ceux-ci d'une façon générale sans présenter l'exposé succinct des lois qui régissent la mer. Toute campagne océanographique est accompagnée par des naturalistes et il est fâcheux que l'inverse n'ait pas toujours eu lieu et que, dans les expéditions zoologiques, la part de l'océanographie ait été trop souvent négligée.

Les principales conditions de la vie dans les profondeurs de l'océan ont été résumées de la façon suivante :

« 1° La vie animale est répandue sur le fond à toutes les profondeurs.

« 2° L'abondance plus ou moins grande de la vie dépend de la présence de l'oxygène, de l'acide carbonique et du phosphate de chaux, probablement aussi de l'azote sous forme ammoniacale.

« 3° La faune des eaux libres a son maximum d'abondance dans deux zones l'une superficielle ou très près de la surface, l'autre sur le fond même ou très près du fond ; l'espace intermédiaire contient beaucoup moins d'animaux.

« 4° Dans les grandes profondeurs, il y a prédominance de spongiaires et d'échinodermes.

« 5° Dans les profondeurs dépassant 900 mètres, la faune offre

partout les mêmes caractères généraux. Les genres de mer profonde sont cosmopolites. Les espèces de mer profonde sont identiques même en des points très éloignés ou bien elles présentent des formes de remplacement.

« 6° La faune de mer profonde montre plus de ressemblance avec les faunes des époques tertiaire et secondaire que la faune de mer improfonde. Cependant, jusqu'à présent, il n'est qu'un très petit nombre de types considérés comme disparus qui aient été découverts dans les profondeurs sous-marines.

« 7° Les formes caractéristiques principales des profondeurs et celles qui se rapprochent le plus des types éteints paraissent surtout exister en plus grand nombre et avec des dimensions plus considérables dans les océans du Sud.

« 8° Le caractère général de la faune profonde se rapproche plus particulièrement de celui de la faune improfonde des hautes latitudes septentrionales et méridionales. Le motif doit en être attribué à la similitude des conditions de température. »

L'être est si intimement relié au milieu qu'il habite qu'il peut être considéré comme un instrument destiné à le mesurer, instrument très sensible quoique, par malheur, il possède deux graves défauts. Il ne renseigne que sur l'ensemble des conditions ambiantes ; il ne donne qu'une indication totale, trop souvent vague à cause de sa généralité même qui gêne pour faire la part de telle ou telle influence particulière. En second lieu, il est insuffisamment gradué, car il ne porte, en quelque sorte, que trois divisions : l'absence lorsque les conditions sont nettement défavorables, la rareté des individus ou leur état chétif quand elles ne sont qu'à demi favorables et enfin leur abondance quand elles sont très favorables. Néanmoins quelles qu'elles soient, les indications fournies sont précieuses : elles racontent l'histoire actuelle de l'être vivant et, transportées par analogie dans le passé, elles éclairent d'une vive lueur les conditions de ce passé.

L'école naturaliste du commencement du siècle dernier et de la fin du précédent ne mérite pas le dédain que trop de gens affectent de lui témoigner aujourd'hui. Heureusement, en science et dans

le reste, les modes viennent, règnent, passent et reviennent. Autrefois, on ne se bornait pas à disséquer un être, on n'observait pas que des organes, on étudiait aussi des mœurs ; on ne voyait pas que l'animal mort, on le regardait aussi agissant, pensant, jouant dans la nature le rôle pour lequel il a été créé, disent les uns, qui l'a créé, disent les autres, mais en tous cas qu'il accomplit parce qu'il est vivant, rôle qui n'est jamais secondaire et qui, surtout, n'est pas à la mesure de son corps car, dans l'économie de la terre, les véritables géants sont les infiniment petits. Qu'est-ce que le corps au prix de l'action ? C'est un court horizon que celui qui a pour limites les bords d'une table de dissection. La théorie zoologique qui a le plus agité le monde scientifique, celle de la lutte pour la vie, n'est après tout qu'une étude de mœurs, et Darwin n'a pas dû user beaucoup de scalpels pour l'établir.

On n'a pas tiré suffisamment parti des fossiles enfouis dans les couches géologiques. Se borner à compter des côtes, des protubérances ou des nervures, à donner des noms, à faire et à défaire des espèces, à énumérer toutes celles qui se rencontrent dans telle ou telle couche de l'écorce terrestre, est l'œuvre respectable d'un collectionneur patient, mais si l'on ne va pas plus loin, on aurait tort de croire que, la liste achevée, tout est terminé. Cette collection de fossiles récoltée, reconnue, recollée, cataloguée, mise dans des boîtes bleues ou même vertes, la besogne sérieuse va commencer. On possède peut-être une date, il faut maintenant interroger le témoin.

La comparaison banale d'un fossile à une médaille a grandement nui à la paléontologie ; plus d'un parmi les savants, depuis Élie de Baumont en France et Mohr en Allemagne, a cessé de prononcer le nom de cette science qu'il a remplacé par ceux de paléozoologie et de paléobotanique. Il ne s'agit pas d'une vaine question de mots mais de la répudiation de toute une doctrine. La médaille est la simple indication d'une date, parfois d'un fait unique. Un fossile est bien davantage. Il est une date et de plus la preuve d'une foule de faits, l'assurance certaine de toutes les conditions de l'époque et du lieu où il vivait et qui existaient alors parce que lui-même

existait. On reconnaît que certains fossiles sont d'eau douce et d'autres d'eau salée. C'est un commencement. Quand donc admettra-t-on, pour ne nous en tenir qu'à ce qui touche à l'océanographie, que parmi les fossiles marins comme parmi les êtres qui peuplent nos mers actuelles, l'océan dont nos vaisseaux sillonnent la surface, dont les flots viennent mouiller nos pieds quand nous nous promenons sur leurs rivages jonchés de coquilles mortes, il y a des fossiles d'eaux chaudes, d'eaux tempérées et d'eaux froides, d'eaux très salées et d'eaux saumâtres, d'eaux agitées et d'eaux calmes, d'eaux limpides et d'eaux troubles, d'eaux profondes, d'eaux demi-profondes et d'eaux superficielles. Température, densité, salure, profondeur, tout est indiqué par le fossile et mieux encore par l'ensemble des fossiles recueillis au même endroit et dont chacun précise et complète les indications de l'autre. Si on le sait, pourquoi procéder comme si on l'ignorait ; si on le sait mal, que ne cherche-t-on à le savoir mieux ? que l'on regarde le présent, il enseignera à la fois le passé et l'avenir.

Certes, la science est trop étendue pour qu'il soit possible à un homme de l'embrasser tout entière, même dans une région limitée comme l'océanographie. Après avoir pris une idée de son ensemble, il convient au véritable curieux de la nature, à l'investigateur ambitieux de sortir des sentiers battus et de lui arracher quelques-uns de ses secrets, de se choisir une spécialité. Mais il est indispensable que les spécialités s'entr'aident et que leurs efforts soient tendus vers le même but. C'est surtout pour la découverte complète de la vérité, qu'il faut avoir recours à l'assistance mutuelle. La connaissance même approximative, pour donner un exemple, de la profondeur à laquelle vivait l'être dont la dépouille vient d'être trouvée dans une couche jadis fond de mer, serait d'une immense utilité pour cette véritable fin de la géologie qui est la reconstitution entière, jusque dans ses moindres détails, de l'histoire de la terre à un moment quelconque de son passé. Pareille évolution s'accomplit dans la science historique humaine. Grâce à des pièces longuement cherchées, élaborées, discutées, à des lettres, à des mémoires, à des documents intimes, livres de raison,

légendes populaires, folklore, on parvient à reconstituer un siècle, on l'oblige à sortir de la nuit, on le fait renaître tout resplendissant de vie aux yeux de l'esprit. Il faut qu'il en soit de même pour l'histoire matérielle du globe.

Le jour où guidé par les observations du zoologiste, le paléozoologiste ou le paléobotaniste auront renseigné celui qui s'occupe d'océanographie pure et de géologie, d'après l'ensemble des fossiles d'une couche, sur les conditions de genèse de celle-ci, il deviendra aisé, de déduction en déduction, de présenter tout le tableau de l'époque. S'agit-il de la profondeur, si la couche a été formée à cinquante, à cinq cents ou à cinq mille mètres, comme elle est maintenant à la surface, une comparaison avec d'autres lambeaux de terrain voisins — ce qui est l'affaire du stratigraphe, — laissera calculer la pente de l'océan disparu, fixer la distance où chacun des points étudiés était jadis du rivage et par conséquent où était ce rivage. On en dessinera la carte et en la comparant avec la carte actuelle, on obtiendra la suite des événements accomplis depuis des centaines de siècles, la quantité dont le sol s'est soulevé, s'est contracté et la mesure de l'érosion postérieure. On sera renseigné sur la mer disparue, on saura si elle était froide ou chaude, fortement salée ou saumâtre, si les vagues y roulaient faibles ou violentes et par conséquent si cette mer, de profondeur connue, était vaste ou d'étendue restreinte. Il n'en faudra pas plus pour acquérir des notions sur sa configuration, car les longues vagues ont eu besoin, pour se former et prendre leur puissance, de venir de plus loin que des vagues courtes et hachées. On aura la mesure de la force des vents capables de soulever de telles vagues, de la continuité de leur action, de leur direction habituelle. On profitera de toutes les indications — et la paléominéralogie même en apportera : la nature et l'état arrondi ou anguleux des grains de sable, leur volume, leurs proportions relatives, la quantité et la qualité de l'argile mélangée, tout fournira matière à certitudes ou du moins à présomptions, selon la solidité des données recueillies : courants marins, nature des roches continentales apportées en débris par

des fleuves au cours lent ou tumultueux, c'est-à-dire coulant sur des pentes douces ou abruptes depuis longtemps desséchées, montagnes dont les vestiges sont maintenant effacés du relief terrestre. N'arrive-t-on pas déjà à de semblables conclusions en traitant par l'acide d'anciens calcaires et en examinant ensuite le résidu insoluble qu'ils ont laissé? Un grain de sable raconte beaucoup, un vestige d'être vivant, plante ou animal, en raconte davantage; à eux deux, ils parlent des mêmes événements auxquels ils ont assisté et qui est une page de l'histoire de la terre. Les témoins corroborent mutuellement leurs dépositions. Il ne s'agit que d'interroger et d'écouter les réponses. Si nous ne comprenons point, c'est notre faute et non pas la leur. Travaillons, sondons les mers, mesurons des variables, comparons, faisons de l'analyse et de la synthèse, traçons des courbes, dressons des tableaux de chiffres et nous finirons par entendre leur langage muet. L'océanographie est une vaste synthèse, introduction indispensable à la reconstitution du passé de notre globe. A l'exception des roches cristallines, — documents se rapportant à une portion infime de cette histoire, celle des révolutions brutales, — l'histoire de la terre est celle des roches sédimentaires, celle des océans qui successivement apparus, disparus pour reparaître encore ont recouvert et recouvrent maintenant sa surface.

Quelques esprits originaux s'efforcent de faire sortir la géologie de l'antique routine; ils ont à lutter mais comme ils aperçoivent distinctement la lumière, ils marchent vers elle d'un pas assuré, insouciants des fatigues et des combats, certains de leur triomphe qui est celui du bon sens. Parmi ceux qui ont montré le chemin et marché les premiers, je citerai quelques noms étrangers — on en comprend le motif — Pfaff, Mohr si digne d'admiration malgré ses erreurs, enfin Walther qui a résumé d'une façon magistrale les lois de la vie organisée et inorganisée au sein des mers et s'est livré à des considérations si suggestives sur les ammonites. Walther a donné une liste des profondeurs auxquelles vivaient la plupart des animaux peuplant l'océan actuel. Je ne me porte pas garant du degré d'exactitude de ce catalogue. D'ailleurs qu'im-

porte. S'il n'est pas aujourd'hui parfait, que les zoologistes y fassent les corrections nécessaires, la science n'est-elle pas une suite d'approximations successives et, en outre, n'est-elle pas maîtresse du temps? Je juge de plus haut un tel document et j'estime qu'on ne saurait lui attribuer trop d'importance. Dès maintenant, il permet de résoudre ce problème capital : mesurer la profondeur à laquelle a été donné un coup de chalut d'après l'ensemble des animaux rapportés. C'est exactement le problème dont la solution, dans le passé, ouvrirait de si vastes horizons à la géologie historique.

Quant aux autres relations des êtres avec ce qu'on pourrait appeler la physique de leur milieu, n'est-on pas entré dans la voie rationnelle lorsqu'on a eu constaté l'uniformité de la faune abyssale dans l'océan tout entier, reconnu ses caractères polaires, conséquence du calme et de la température des eaux profondes, observé à mesure qu'on se rapproche davantage des pôles le relèvement vers la surface de l'habitat de ces espèces, expliqué leur caractère archaïque par l'abri qu'ont trouvé les espèces anciennes au fond des abîmes? Que de conclusions applicables aux époques coralliennes anciennes sont tirées des conditions de l'habitat des espèces coralliennes actuelles!

Je n'ai à m'occuper ici ni de la manière d'étudier sur place ou dans le laboratoire, ni du mode de conservation des animaux récoltés à la mer. Ce travail concerne les naturalistes. Ayant eu l'honneur de recevoir l'hospitalité de S. A. S. le prince de Monaco à bord de son yacht, de voir de mes yeux l'excellence des résultats obtenus par une longue pratique de ces opérations et la possession d'engins construits, essayés, sans cesse perfectionnés avec une libéralité qui ne recule devant aucune dépense de temps et d'argent, aucun effort pour avoir mieux ce qui est bien, tenu par sa bienveillance et par celle de ses collaborateurs habituels au courant de toutes les modifications apportées à l'outillage, je crois rendre service en communiquant à mon tour aux autres mon expérience. J'ai été trop souvent interrogé à ce sujet pour n'être pas convaincu d'être utile. Ceux qui, renseignés d'une façon

générale sur ce qui s'exécute à la mer, auront besoin de plus amples informations n'auront pas de peine à se les procurer. Je décrirai donc une station océanographique complète en haute mer.

La première opération consiste à mesurer la profondeur : si elle est faible, ou emploiera le petit sondeur portatif à fil d'acier de Belloc simplifié qu'on manœuvre à la main et qui peut s'installer sur une embarcation ; pour les grandes profondeurs nous savons qu'on se sert d'un treuil à vapeur et d'un câble fin en fils d'acier. Le plomb de sonde est le plus souvent à poids perdu. Au-dessus de lui, on fixe une bouteille à recueillir l'eau portant son thermomètre et, au-dessus, à des distances connues, une série aussi nombreuse que possible de bouteilles Richard munies chacune de son thermomètre. Une seule opération fournit donc la profondeur, un échantillon du fond ramené par le tube creux du sondeur ainsi que plusieurs échantillons d'eaux avec leur température respective échelonnés à intervalles connus depuis le fond jusqu'à la surface. Pendant l'opération on a effectué des observations astronomiques qui ont permis de connaître la longitude et la latitude du point où l'on se trouve.

La seconde opération consiste à mouiller une nasse. On donne ce nom à une carcasse en bois léger en forme de prisme triangulaire, recouverte d'un filet et lestée de quatre sacs remplis de pierres pour l'entraîner au fond. Sur les deux bases verticales du prisme sont ménagées deux ouvertures par lesquelles les animaux peuvent entrer mais d'où il leur est impossible de sortir. A l'intérieur, on suspend de la boëtte, morceaux de poisson, tessons de porcelaine blanche que la phosphorescence rendra visibles, quelquefois aussi des tubes phosphorescents en verre, remplis de sulfure de calcium et de paraffine, afin de n'être pas écrasés par la pression des grands fonds. On file la nasse attachée d'abord à un bout de filin, puis à un câble en acier auquel on fixe, dès qu'il cesse de descendre, une très grosse bouée qu'on surmonte d'un pavillon afin de la rendre visible de loin, pendant le jour, et sur laquelle on allume un fanal pendant la nuit.

A la nasse on ajoute une palangre. L'engin est une longue

ligne à laquelle sont attachées, à des intervalles égaux de trois ou quatre mètres, de courtes lignes ou avançons portant un hameçon. La nasse et sa bouée étant rendues libres de tout lien avec le bâtiment, on enfile dans son câble un anneau qui soutient la ligne de palangre. L'embarcation qui la porte s'éloigne doucement en la déroulant dans la mer. Aussitôt qu'elle a été complètement filée avec tous ses hameçons boëttés, on la termine par un second anneau qui est introduit dans le fil de sonde mis une seconde fois à l'eau. On leste et on lâche en même temps les deux anneaux l'un sur le fil de sonde et l'autre sur le câble de la bouée. La palangre descend, parvient sur le fond et alors on relève le fil de sonde. D'autres fois on se contente de lester faiblement l'extrémité de la palangre, de la tendre autant que possible et de la laisser descendre par son propre poids en glissant d'un côté sur le câble de la nasse. On abandonne le tout pendant un, deux ou trois jours, temps de se livrer au dragage ou à d'autres opérations.

La bouée de nasse fixe en un point déterminé de l'océan dont on connaît la profondeur d'eau, constitue une station dont on n'a pas, jusqu'à présent, profité autant qu'on aurait pu le faire ; elle ne tardera pas à être utilisée pour une foule d'expériences et de mesures qui font défaut à l'océanographie. On aurait, avec elle, l'avantage de recueillir des indications continues et pour lesquelles il suffirait d'imaginer quelques instruments enregistreurs. On mesurerait par exemple, en même temps les courants superficiels et profonds ; peut-être parviendrait-on à enregistrer l'effet des marées en haute mer, encore absolument inconnu au point de vue expérimental ; on aurait des tracés de vagues, des informations comparées sur les variations de pénétration de la chaleur et de l'éclairement pendant le cours entier d'une journée ; les modifications de la densité renseigneraient sur l'évaporation et la circulation générale océanique. On ne mentionne ici que quelques-unes des nombreuses expériences qu'il serait facile d'exécuter grâce à cet observatoire temporaire immobile au milieu de l'océan. L'emploi de la bouée de nasse est certainement une des méthodes qui, en océanographie, ont le plus d'avenir. On aura été longtemps

sans y songer ; lorsqu'on aura commencé à l'utiliser, on en tirera un parti extraordinaire.

Rien n'empêche même de réduire cet appareil à sa plus simple expression, si l'on ne tient pas à récolter d'animaux et qu'on se borne à faire de l'océanographie pure, en remplaçant la nasse par un sac ou une caisse remplie de pierres et la bouée par le plus élémentaire et le meilleur marché des flotteurs, une planche, portant un pavillon destiné à la rendre visible de loin. Les opérations achevées, on coupe la corde, on recueille la bouée et on abandonne le sac de pierres.

Pendant que les poissons et les autres animaux se prennent aux palangres et dans la nasse, on procède au chalutage. Le sondage a occupé une matinée, la mise à l'eau de la nasse un après-midi à la condition que l'on n'ait pas perdu un instant et que la profondeur ne soit pas trop considérable, le soleil s'est couché, le fanal de la bouée a été allumé, on passe la nuit à croiser en vue de ce feu solitaire que berce la houle et le lendemain, dès le matin, on commence à chaluter.

Chacun connaît la disposition du chalut, vaste poche en filet dont l'ouverture est soutenue par une armature en fer forgé et à laquelle sont attachés, de chaque côté de l'entrée et parfois aussi latéralement, des fauberts, paquets de cordelettes de chanvre dont on se servait autrefois pour sécher le pont après le lavage. On envoie le chalut à la mer, on fait suivre le câble d'acier qui le retient en y ajoutant, à quelque distance en avant, une ou deux olives, lourds poids en fonte destinés à permettre au filet de bien s'étaler sur le sol et de ne pas avoir son orifice relevé pendant le traînage.

On file le câble en lui donnant une longueur d'un bon tiers supérieure à la profondeur de la mer, connue par le sondage de la veille. Arrivé au fond, après avoir laissé le mou suffisant, on assure son extrémité et l'on marche à très petite vitesse. Le chalut racle le sol et emprisonne les êtres qu'il rencontre sur son passage. Afin de se rendre compte de la tension qu'il supporte et qui pourrait, si l'on n'y prêtait une attention continuelle, provoquer

une rupture du câble, celui-ci passe sur une poulie dynamométrique avec ressort servant d'accumulateur où la tension est indiquée en tonnes sur un cadran bien visible. Si cette tension s'exagérait, on porterait remède du danger en diminuant la vitesse ou même, s'il y avait lieu, en revenant sur sa route.

Après trois ou quatre heures de traînage, on relève le chalut avec le treuil à vapeur. Pendant trois, quatre ou cinq heures quelquefois, on voit le câble dont l'image tremblante se perd dans le bleu sombre des vagues, en apparence toujours à la même place, frémissant sous la charge énorme qu'il soulève, s'enrouler sur le tambour. Un compteur enregistre les longueurs enroulées et par conséquent celles qui restent encore dehors. Les yeux interrogent sans cesse l'accumulateur qui atténue les secousses et le dynamomètre qui marque la tension. On veille avec un soin extrême à ce qu'aucune coque ne se forme, accident fréquent à cause des mouvements de roulis et de tangage du bâtiment qui alternativement mollissent et raidissent le câble. Le moment s'approche où le chalut va parvenir à la surface. On voit rallier de tous les côtés du bâtiment sur le pont tous ceux dont les fonctions ou les occupations leur permettaient d'éviter la fastidieuse monotonie du tirage; les naturalistes ont revêtu la longue blouse de toile et chaussé les bottes en caoutchouc. La récolte sera-t-elle bonne ou mauvaise? Il faut avoir assisté à ces opérations pour comprendre la véritable fièvre, presque l'angoisse qui étreint alors les cœurs. La montée s'est effectuée sans encombre. Que de fois, dans un coup de roulis trop brusque, l'enroulement n'étant pas convenablement réglé, une seconde d'inattention de la part du mécanicien, une erreur d'appréciation dans le rythme du mouvement, un hasard, un rien et le câble s'est cassé net, retombant dans la mer, englouti à jamais avec le coûteux engin qui y était attaché. Que de temps, de peines, de travail et d'argent perdus ! On a imaginé récemment des appareils destinés à arrêter automatiquement le tronçon de câble et qui, s'ils fonctionnent bien, rendront de précieux services. La première olive apparaît, elle monte le long du bord. Arrivée à la hauteur de la lisse, on stoppe pour permettre à un homme de la détacher du

câble en coupant les brins de filins qui l'y retiennent. On recommence à hisser ; la seconde olive apparaît à son tour et est détachée comme la première. Chacun escalade les bastingages, grimpe sur les enfléchures des haubans, se penche sur la mer et plonge ses regards, perpendiculairement, à travers l'eau transparente. Enfin une tache noire, indécise, à contours ondoyants, à reflets tour à tour éclatants de lumière ou pleins d'une ombre épaisse, teintée de tons glauques ou bleu d'azur sort doucement de l'abîme; elle monte, se fait plus distincte, enveloppée d'un nuage blanc de vase qui transsude à travers les mailles et laisse derrière elle une traînée semblable à une voie lactée au milieu de l'eau limpide, avec de grandes ondulations dont chacune correspond à un coup de roulis du bâtiment. L'armature en fer forgé est parfois tordue malgré ses fortes dimensions, si elle a rencontré au fond des blocs de roches, peut-être des épaves de bâtiments naufragés endormis depuis des siècles dans le silence et dont le sommeil, un moment troublé, va rentrer dans un repos qui durera des siècles avant d'être de nouveau troublé, s'il doit l'être jamais. Le chalut monte jusqu'à la hauteur de la grand'vergue de misaine, il est entièrement hors de l'eau et la boue qu'il contient agglomérée en un énorme paquet à son extrémité inférieure laisse tomber de grosses éclaboussures blanches.

Sur le pont, au-dessus d'un socle bas en forme de caisse à claire-voie sont superposés trois gros tamis métalliques à mailles de grosseurs décroissantes. C'est au-dessus de ces tamis qu'est amené le chalut. On défait le nœud qui en fermait le fond ; il s'ouvre et verse son contenu dans le tamis. Les fauberts sont détachés et, dans un coin du pont, suspendus à bonne hauteur; on s'empresse en coupant les brins de chanvre avec de fins ciseaux, de s'emparer des crustacés, des fragments de coraux qui s'y sont accrochés et sont restés enchevêtrés.

Sur le tamis rempli, le tuyau d'une pompe à incendie commence à déverser des flots d'eau de mer. Les naturalistes, rangés tout autour, les bras nus, fouillant dans cette boue glacée, recueillent avec d'infinies précautions les animaux qui y sont enfouis, les

lavent et les déposent sur des plateaux en zinc. L'eau ruisselle, traverse les tamis superposés, remplit la caisse inférieure qui déborde au roulis et couvre le pont, sur l'avant, d'un liquide laiteux qui s'écoule par les dalots, tombe à la mer et trace des bandes blanches dans le sillage. La vase a vu quelques instants la lumière du jour ; elle retourne aux ténèbres qu'elle vient de quitter. Les naturalistes continuent leur besogne. De temps en temps, un cri de joie et d'admiration signale la découverte d'une pièce rare ou inconnue. La boue a été emportée par le courant d'eau ; il ne reste plus rien et quand le tamis supérieur vide est soulevé et mis à part, on trouve encore arrêtés par les mailles plus fines des deux autres tamis, de petits fragments de roches qui deviennent la proie du lithologiste. La récolte est terminée.

Les animaux sont souvent mutilés, car le chalut est brutal, mais ils possèdent encore les nuances de la vie que fera disparaître l'alcool dans lequel on est obligé de les conserver pour les ramener à terre et les confier au spécialiste qui en fera l'étude détaillée et définitive. C'est pourquoi à peine l'animal est-il débarrassé de la vase qui le souille qu'il est étalé dans un cristallisoir rempli d'eau pure et remis à un artiste qui tout aussitôt prend « la note de couleur », c'est-à-dire en fait le portrait colorié destiné à être à son tour recopié et complété dans les planches qui illustreront les monographies publiées. Alors seulement l'animal est retiré de l'eau, plongé dans l'alcool et placé dans des flacons ou des tubes soigneusement bouchés.

La journée s'est achevée, le soleil s'est couché dans ses splendeurs de pourpre et d'or, l'obscurité s'est étendue presque instantanément sur les vagues ; on a rallié la bouée dont on s'était quelque peu écarté et qui, semblable à un point au milieu des flots, monte sur la crête des lames de houle ou disparaît dans leur creux ; on s'approche d'elle, on met une embarcation à la mer et trois hommes s'en vont allumer le fanal. Cette nuit comme la précédente, on croisera dans son voisinage.

Le lendemain matin le travail reprend. La bouée est hissée à bord et le câble de la nasse s'enroule lentement autour du tambour.

La nasse sort de l'eau ; elle est soulevée au-dessus des bastingages, descendue sur le pont et son contenu est recueilli, poissons aux formes bizarres, à la tête énorme et au corps grêle, quelquefois filiforme, à la bouche gigantesque faite pour qu'aucune des proies si rares dans les solitudes des abîmes ne puisse échapper et nourrisse ce corps réduit à son minimum de volume ; on y trouve des crustacés, de longues crevettes écarlates destinées à être l'ornement des collections et dont on s'amuse à faire cuire quelques-unes afin de permettre à ceux auxquels elles seront servies, de se vanter d'avoir mangé un met aussi rare que précieux, — car il vaut beaucoup plus que son pesant d'or, — que mauvais au goût parce que cette chair n'est qu'une matière gélatineuse molle et insipide. Les pièces sont dessinées, s'il y a lieu, et mises dans l'alcool.

Mais en même temps qu'apparaissait la nasse, arrivait aussi l'anneau auquel était fixée l'extrémité des palangres. On hisse à bord cette longue ligne ; les avançons montent un à un. Beaucoup sont vides car les très grandes profondeurs sont peu peuplées, surtout de gros poissons susceptibles d'être pris à l'hameçon. Les captures n'en ont que plus de valeur. J'ai vu arriver un jour deux requins et jamais il ne m'a été donné de contempler bêtes plus hideuses et plus répugnantes. Le requin de surface possède une figure de brute et d'assassin, en même temps vile et féroce. Dans l'eau calme des tropiques, autour du navire immobilisé par la pêche, du haut de la dunette, on les voit évoluer chacun accompagné de son poisson pilote rayé de noir et de jaune qui se tient en avant, tout contre son museau pointu et de sa daurade qui nage constamment sous son ventre. Le requin erre à droite et à gauche, il monte et descend sans se presser, happe ce qui vient du bord, débris de cuisine tout comme l'homme qui tomberait à l'eau, tout comme le morceau de lard dont il est particulièrement friand et avec lequel on amorce l'émerillon destiné à l'accrocher. L'animal est doué d'une incroyable puissance vitale ; on dirait qu'il est insensible à la douleur. Dans l'archipel du Cap Vert, au mouillage, une embarcation montée par un nègre était amarrée à l'échelle de bâbord. Un requin tournait autour d'elle, si près de la surface que

parfois la pointe de son museau sortait de l'eau. Le nègre qui le guettait lui appliquait chaque fois un violent coup d'aviron, la seule arme qu'il eût à sa disposition ; le requin passait sous l'embarcation, relevait le nez et recevait un autre coup d'aviron ; il revint trois ou quatre fois. Un autre jour un requin qui se promenait le long du bord, reçut à travers la tête une balle à pointe d'acier ; on vit le trou. La bête se retourna plongea et s'en alla un peu plus loin, à quelques mètres, essayer de saisir le morceau de lard qui amorçait un émerillon que lui tendait un matelot. Il le manqua et partit soigner sa blessure, à supposer qu'il l'ait sentie. Peu après, on s'empara d'un requin d'espèce rare. Amené sur le pont, solidement amarré, le malheureux eut affaire à quatre naturalistes — ils étaient quatre — qui lui ouvrirent le ventre, prirent des échantillons de ses divers liquides intérieurs, introduisirent partout des thermomètres, taillèrent, coupèrent ses viscères, le cœur, le foie, l'estomac, déroulèrent ses intestins, y cherchèrent avec des pinces les parasites qui y abondent — il y a de ces malpropres petites bêtes dans l'eau comme dans l'air, chez les requins comme ailleurs, — tout fut détaché éparpillé ; l'intérieur était vide ; l'opération dura bien une demi-heure. Au bout de ce temps, comme on lui touchait l'œil, l'animal fit un soubresaut, la gueule s'ouvrit, montrant ses terribles rangées de dents et se ferma avec le bruit sec d'un ressort.

Si horrible que soit le requin de surface, le requin des profondeurs est plus horrible encore. Je conserve le souvenir de l'aspect répugnant des deux que j'ai vus pris à la même palangre. Qu'on s'imagine deux masses noires, molles, flasques, aplaties sur les planches du pont, à peau non pas rugueuse mais lisse, luisante, une tête plate rappelant un peu celle de la vipère et un œil que je ne sais comment qualifier sinon par le mot atroce : œil petit, éclairé d'une lueur phosphorescente, livide et profond comme un immense souterrain, aux parois tout imprégnées jusqu'au plus profond, toujours plus profond de ses profondeurs, d'une lumière pâle et verdâtre. On vida les deux requins, on les bourra d'étoupe imbibée de formol, on recousit proprement leur ventre, on les allongea dans

LE CHALUT REMONTE ET VA APPARAÎTRE

L'OUVERTURE DU CHALUT REMONTANT

une belle caisse en zinc, puis dans une non moins belle caisse en bois, et ils habitent maintenant le musée océanographique de Monaco.

Pendant le cours d'une campagne sur mer, il convient surtout de recueillir des documents aussi nombreux que possible en notant jusqu'aux moindres circonstances qui s'y rapportent. L'idéal serait de n'en négliger aucun ; combien de fois arrive-t-il qu'une particularité futile en apparence prenne à l'étude une importance capitale. J'ai fait bien des campagnes, je suis pénétré de la recommandation que j'énonce, j'ai pris bien des notes dans ma mémoire et surtout sur le papier, et il n'est pas un de mes voyages qui ne m'ait laissé non des remords, car j'ai fait de mon mieux, mais des regrets de n'avoir pas remarqué certains détails qui prenaient subitement un intérêt inattendu. C'est pourquoi, à mon avis, toutes les expériences, les mesures, sauf les plus rigoureusement indispensables, doivent être laissées de côté pour n'être exécutées qu'au retour, dans la tranquillité et le confortable scientifique du laboratoire, chacune par son spécialiste. Quelque parfaite que soit l'installation à bord, on aura toujours à compter avec le manque d'espace, la gêne mutuelle de personnes travaillant les unes à côté des autres, le mouvement du navire, le peu de lumière. Il faut y avoir passé pour être réellement convaincu. A bord la récolte des documents, les mesures absolument nécessaires, la prise de notes, de beaucoup de notes, la conception d'idées générales résultant de la vue d'ensemble des phénomènes, à terre la mise en œuvre des matériaux, l'élaboration complète et définitive par la vérification expérimentale des hypothèses.

C'est pour obéir à cette maxime qu'à n'importe quel moment, en marche comme en opération, il faut s'emparer de tout ce qui passe à portée. Une épave flottante, si on parvient à mettre un canot à la mer pour s'en saisir, peut être un butin précieux. De grands haveneaux sont disposés du côté intérieur des bastingages, filets arrondis comme les épuisettes des pêcheurs à la ligne, munis d'un long manche en bambou à la fois solide et léger. Si l'on traverse des parages abondants en vellèles, en physalies et qu'on en voie

défiler près du bord, le haveneau servira à les prendre. On recueillit ainsi, un jour, un jeune céphalopode excessivement rare. Au mouillage, s'il y a des rochers, on pose le tramail. Près de l'île de Santa-Lucia, dans l'archipel du Cap-Vert, au coucher du soleil, on le tendit ; le matin on alla le relever : il rapporta une telle abondance de poissons qu'il en fournit le laboratoire aussi bien que le garde-manger glacière, ce qui ne fut pas à dédaigner. Jamais je n'ai admiré plus riches couleurs ; les plus éclatantes pierreries n'en sauraient donner une idée, poissons en rubis, en émeraudes, en saphirs, en topazes, crustacés bizarres, sans compter neuf requins qui avaient entortillé et déchiré les filets d'une façon dont se souvient le matelot qui consacra plusieurs jours à les ramender après avoir commencé à en couper une bonne partie qui n'était certes pas une partie bonne. A ce propos, il est remarquable de constater combien il faut peu de chose pour prendre des animaux si puissants, si vivaces. On en ramène qui ne sont retenus que par un simple fil et qui, probablement, sont morts asphyxiés.

D'autres pêches se font encore d'animaux infiniment petits, de plankton, avec le filet de traîne en gaze de soie fine, le filet Buignet, le filet à rideau qui, s'ouvrant et se fermant à volonté lorsqu'il a été descendu à une profondeur déterminée, permet de ne récolter que les êtres vivant à cette profondeur sans aucun mélange d'individus que, s'il était resté ouvert, ce filet aurait pris au passage dans les couches d'eau supérieures, pendant sa montée ou pendant sa descente. Il suffit de citer ces engins, leur description entraînerait trop loin et les spécialistes qui auraient intérêt à la connaître ne seront pas embarrassés pour la trouver. Je ne parlerai plus que d'une autre pêche, celle des cétacés.

Ces animaux, mammifères marins et par conséquent obligés de venir respirer hors de l'eau, sont intéressants par eux-mêmes et pour un autre motif. Les céphalopodes, pieuvres, calmars, poulpes, seiches, classe d'animaux dont plusieurs possèdent d'énormes dimensions, ne viennent jamais à la surface pas plus qu'ils ne se tiennent à l'extrême fond ; ils demeurent continuellement à des

profondeurs intermédiaires, d'ailleurs encore inconnues, où l'on ne sait les aller surprendre et c'est pourquoi leur histoire est l'une des plus incertaines de la zoologie de la mer. Les exemplaires complets sont d'une grande rareté, à supposer même qu'il en existe ; on ne se les procure qu'en fragments. Or les céphalopodes servent à la nourriture des cétacés qui les chassent dans leur zone d'habitat certainement assez peu profonde, puisque le cétacé peut y descendre, chercher sa proie, la trouver, la poursuivre, s'en emparer et remonter dans l'intervalle de temps compris entre deux aspirations d'air. Prendre le cétacé c'est prendre le céphalopode, et le premier soin, lorsque quelque globicéphale ou quelque orque est capturé, est d'ouvrir son estomac et de récolter les débris de céphalopodes non encore digérés qu'il contient. La besogne ne laisse pas que d'être assez peu ragoûtante ; comme elle est indispensable, les zoologistes l'accomplissent bravement, et il y a lieu de leur en savoir incomparablement plus de gré que ne le supposent les personnes ayant assisté, même de loin, à l'opération.

Les petits cétacés, marsouins, souffleurs et autres, se pêchent au harpon. Un homme s'installe dans une cage spécialement installée à cet effet sous le beaupré, tenant son harpon muni d'une longue corde. Les marsouins en se jouant tournent autour du bateau et bondissent hors de l'eau ; on leur lance le harpon au passage ; on laisse filer la corde à laquelle est attachée une bouée que l'animal emporte avec lui lorsqu'il est frappé. On met aussitôt une embarcation à la mer. Il plonge, entraînant le flotteur, et ne tarde guère à remonter pour respirer, mais la bouée indique sa trace, ses forces s'épuisent et on finit par s'en emparer.

Les gros cétacés, globicéphales, baleines, se pêchent au fusil-harpon. L'instrument est terrible, et même trop terrible. Les Norvégiens se livrent à cette pêche dans les Lofoten et autour de Vardö, sur des bâtiments à vapeur avec de véritables canons-harpons qui lancent un projectile si perfectionné que non seulement il pénètre dans le corps de l'animal et s'y fixe de telle manière qu'il n'y a guère de chances pour qu'il se détache, mais, en outre, il porte une balle explosible, éclatant comme un obus au choc contre un os et

qui foudroie la victime. Cette source de richesse pour le pays est en train de se tarir rapidement et le dépeuplement a lieu dans des proportions effrayantes. Le massacre est d'autant plus complet que ces animaux sont peu farouches. Dans les régions intertropicales de l'Atlantique, j'en ai vu entourant le bâtiment par troupeaux d'une centaine d'individus. Il montrent alternativement leur nageoire dorsale et leur tête globuleuse qui leur a valu leur nom ; ils plongent, disparaissent et reparaissent. Quelquefois ils s'arrêtent, se redressent verticalement, sortent en partie de l'eau et considèrent curieusement le bateau, cet autre animal encore plus gros qu'eux, puis ils s'enfoncent doucement en produisant derrière eux un tourbillon. On s'explique bien à ce spectacle les vieilles fables des sirènes, les tritons joufflus soufflant dans leurs conques, toute la cour du puissant Neptune et le cortège d'Amphitrite. En cela comme dans le reste, les Grecs ont revêtu la réalité des divins ornements de la poésie ; ils l'ont embellie, l'ont énormément embellie et sont pourtant restés vrais.

La pêche se fait le plus souvent en baleinière. Le fusil-harpon est à l'avant, sur son pivot ; derrière le harponneur sont les hommes aux avirons et, à l'arrière, debout, afin d'être plus libre de ses mouvements et manœuvrer avec plus de précision, le patron gouverne, non avec le gouvernail dont l'action ne serait pas assez instantanément puissante, mais avec un long aviron. L'animal passe à portée, le coup part, le harpon se fixe, le cétacé plonge en entraînant la corde attachée au harpon, dont l'extrémité reste à bord de la baleinière et qu'on laisse se dévider ou qu'on rentre tour à tour. Bientôt il remonte pour respirer ; on cherche à le piquer de nouveau s'il est à portée. Quand il n'est pas grièvement blessé et que le harpon tient bien, il lui arrive de remorquer ainsi l'embarcation qui file sur les flots tous les avirons rentrés. Mais la bête s'épuise ; une seconde baleinière armée comme la première essaie de lui envoyer un second harpon ; le cétacé affaibli se laisse approcher ; on l'achève à coups de lance et on le ramène près du bord. Cette pêche est l'industrie des Açores ; les baleines tuées au large sont remorquées sur le rivage et y sont dépecées.

La pêche à la sardine a beaucoup fait parler d'elle et l'histoire seule de ses migrations, de ses apparitions ou disparitions subites sur les côtes a donné lieu à une littérature véritablement de poids, car je sais un savant qui, ayant commencé à collectionner les brochures ou mémoires publiés à ce sujet, en possédait déjà, il y a quelques mois, environ 700 kilogrammes ! Rien d'étonnant, par conséquent, à ce que la question soit encore un peu obscure. Quoi qu'il en soit, la pêche à la sardine, quand ce poisson veut bien donner, se fait de la manière suivante.

Les bateaux sardiniers partent de grand matin. Arrivés sur le terrain de pêche, selon la grosseur de la sardine, les pêcheurs choisissent un filet à mailles plus ou moins fines et teinté en bleu afin d'être moins visible et ils le mettent à l'eau. La forme est celle d'un grand rectangle assez long mais peu élevé et il est maintenu vertical par des morceaux de liège espacés sur son bord supérieur et souvent par quelques plombs à sa partie inférieure. La sardine se tient à une certaine profondeur ; pour qu'elle monte à la surface, on lui jette de la rogue, ovaires de morues bourrés d'œufs. La hausse considérable du prix de la rogue, qui a triplé de prix depuis deux ou trois ans, est une des causes qui ont eu une influence sérieuse sur la crise de l'industrie sardinière, pêche et fabrication des sardines à l'huile. On met une certaine quantité de ces ovaires dans un seau et, avec les mains, on les déchire pour qu'ils laissent échapper les œufs comme une bouillie claire qu'on jette par poignées autour du bateau. La sardine, très friande de cette boëtte, monte à la surface — quand elle se trouve dans la localité et qu'elle n'est pas trop repue, car alors la distribution de rogue est faite en pure perte — et on l'entoure silencieusement avec le filet. Bientôt effrayée, elle cherche à s'échapper et, dans sa fuite, elle se prend par les ouïes, se *maille* dans les mailles du filet. On embarque et pour démailler le poisson sans y toucher, car aucun n'est plus délicat et plus prompt à se corrompre, deux hommes placés en face l'un de l'autre reploient lentement le filet et lui communiquent par intervalles un très rapide mouvement saccadé de va-et-vient. La sardine se détache et on la range dans des paniers.

Le jour même elle est portée à terre, vendue et préparée dans les usines ou friteries. Des femmes lui arrachent la tête et l'étripent ; on la lave et on la laisse pendant une heure ou deux dans une saumure. On l'en retire, on la sèche à l'air, on la place dans des supports en fils métalliques galvanisés où chacune est isolée, on la fait passer dans un bain d'huile bouillante. Egouttée et refroidie, on l'empile dans des boîtes dont on fait ensuite le plein avec de l'huile froide, on soude le couvercle, on réchauffe les boîtes à l'eau bouillante, on achève la soudure, et la boîte de sardines est prête pour la vente.

CHAPITRE X

LA GLACE

Les phénomènes si variés qui s'accomplissent dans les régions polaires dépendent tous des propriétés physiques et chimiques de la glace. On essaierait vainement de les décrire ou seulement même de les énumérer, tant leur nombre est considérable et leur variété extrême. Au contraire, tous sans en excepter un seul, pourront se deviner ou plutôt se prévoir, s'expliquer aisément soit qu'ils frappent les regards si l'on voyage dans les régions polaires, soit qu'on en lise la description dans les récits des explorateurs, dès que l'on connaîtra les propriétés de la glace. Telle est la raison pour laquelle nous allons énoncer rapidement les divers caractères de l'eau congelée.

L'eau affecte dans la nature trois états physiques différents. Gazeuse, quand elle se répand en vapeur dans l'atmosphère, elle constitue, lorsqu'elle est liquide, la masse énorme des eaux océaniques et continentales ; enfin elle est solide sous forme de glace. Ces trois états, pour un même échantillon, se succèdent grâce à un apport ou une soustraction de chaleur. Chacun d'eux présente des propriétés spéciales. C'est de l'état solide ou de glace que nous nous occuperons.

Si en hiver on abandonne à l'air libre, la température étant inférieure à zéro, un vase rempli d'eau, le liquide ne tarde pas à se solidifier, à se congeler. Il se change en un bloc plus ou moins limpide, très dur et cassant. La transformation s'accomplit à une température identique dans les conditions ordinaires et qui est celle qui a été choisie pour l'un des deux points fixes de l'échelle

thermométrique centigrade, le point zéro. Le second point fixe est celui qui correspond à la transformation brusque de l'eau liquide en vapeur. Nous n'avons pas à nous en inquiéter ici et il suffira de noter qu'à partir de la température de zéro et pour toutes les températures inférieures, l'eau affecte la forme solide de glace.

La température de fusion est identique à la température de solidification. En d'autres termes, une masse d'eau se congèle et un bloc de glace commence à fondre à la même température, ou encore la température minimum de fusion et la température maximum de congélation sont les mêmes, toutes choses étant égales d'ailleurs.

Si l'on considère de plus près les phénomènes, on remarque que les faits ne sont pas toujours rigoureusement conformes à la loi qu i vient d'être énoncée. Si la pression, au lieu d'être celle qui règne moyennement au niveau de la mer qui correspond à 760 millimètres de mercure, augmente ou diminue, la température de congélation ou de fusion subit de faibles variations. La pression abaisse la température de fusion de la glace. De l'eau solide fortement comprimée se liquéfie et, en admettant que la température extérieûre n'ait pas changé, elle reprend instantanément la forme solide dès que la compression cesse de s'exercer. Tel est le résultat que M. Mousson a su mettre en lumière par une expérience aussi simple qu'ingénieuse et sir W. Thomson a reconnu que l'abaissement du point de fusion était de 75 dix-millièmes de degré pour chaque atmosphère de pression en excès, de sorte que pour l'abaisser de 1 degré, il faudrait 133,5 atmosphères correspondant à un poids de 133 kilogrammes par centimètre carré. Or la pression ordinaire est seulement de 1 kilogramme environ pour cette même surface de 1 centimètre carré. D'énormes pressions peuvent se rencontrer dans les portions inférieures des glaciers, surchargées par le poids des masses sus-jacentes. La densité du mercure étant de 13,6, la pression de 133 kilogrammes par centimètre carré de surface équivaudra à une épaisseur de 1 380 mètres de glace environ. Cette épaisseur ne se rencontre pas dans bien des glaciers, peut-être même aucun ne la possède-t-il ; mais, d'autre

part, les phénomènes naturels relatifs aux glaciers n'ont pas besoin, pour devenir explicables, d'exiger une différence de 1 degré dans la température de liquéfaction de l'eau ; il suffit que cette liquéfaction se produise, c'est-à-dire de quelques fractions de degré.

D'autre part, si la masse d'eau liquide soumise au refroidissement est contenue dans des espaces très petits, dans des tubes capillaires, son point de congélation est considérablement abaissé. On a pu amener ainsi de l'eau, avec des précautions, jusqu'à —20 degrés sans qu'elle cesse d'être liquide. Dans la nature, les liquides aqueux contenus dans les vaisseaux des végétaux, sont susceptibles de supporter des froids très rigoureux, et d'autant plus qu'ils ne sont même pas de l'eau pure. Les solutions salines gèlent en effet plus difficilement que l'eau pure. Cette loi étend considérablement, tant en altitude qu'en latitude, les limites de la végétation.

Pour que l'eau passe de l'état de glace solide à celui d'eau liquide à la même température, il faut lui fournir une certaine quantité de chaleur dite chaleur latente de fusion de la glace. On évalue celle-ci en calories, quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau liquide. Des mesures expérimentales ont démontré que la transformation de la glace en eau exigeait 79,25 calories. En d'autres termes, la quantité de chaleur à fournir à 1 kilogramme de glace pour le liquéfier, sans d'ailleurs modifier en quoi que ce soit sa température même, suffirait à échauffer de 1 degré, 79 kilogr. 25 d'eau ou encore, ce qui revient au même, à échauffer de 0 à 79,25 degrés, 1 kilogramme d'eau liquide. Toute cette chaleur, insensible au dehors, a été dépensée uniquement pour produire le changement d'état.

Inversement, si l'absorption de 79,25 calories est indispensable à fournir à la glace pour la transformer en eau liquide sans d'ailleurs modifier sa température, la même quantité de chaleur sera dégagée par de l'eau liquide passant à l'état de glace solide. Les variations des climats terrestres s'atténueront de cette façon. Le passage du froid au chaud, celui du chaud au froid seront moins

brusques ; les transitions de l'hiver à l'été et de l'été à l'hiver seront plus douces. Le Dr Forel a calculé qu'à l'époque du rigoureux hiver de 1879, la congélation du lac de Genève avait autant adouci la température ambiante que si l'on avait, pendant toute la durée de la prise du lac, brûlé dans l'air 250 000 tonnes de houille par jour.

M. Pettersson, en mesurant les données calorimétriques sur de l'eau de mer, a trouvé que la chaleur développée par la congélation ou absorbée par la liquéfaction de cette eau était notablement inférieure à celle de l'eau pure dans les mêmes circonstances et d'autant plus que la glace étudiée contenait plus de matières salines.

Personne n'ignore que la glace flotte dans l'eau et, en effet, à volume égal, elle est plus légère que l'eau ou, en d'autres termes, sa densité est moindre. La densité de l'eau distillée à la température de 4 degrés, température à laquelle a lieu le maximum de cette densité, est de 1, ce qui veut dire que 1 décimètre cube d'eau ou 1 litre pèse alors exactement 1 kilogramme. La densité de la glace fabriquée avec cette même eau douce et bien exempte de bulles d'air sera 0,917 ; le poids de 1 décimètre cube ne sera plus que de 917 grammes.

Si la glace était plus lourde que l'eau ainsi qu'il arrive d'ailleurs pour la plupart des corps, métaux et autres, qui pèsent davantage solides que liquides, comme dans un lac, elle se forme à la surface au contact de l'air froid, elle tomberait aussitôt sur le fond et s'y accumulerait. Comme de plus, l'eau est mauvaise conductrice de la chaleur, elle protégerait pendant l'été, la glace contre la fusion. L'hiver suivant, le même phénomène se renouvellerait et en peu de temps, les lacs, sauf ceux des régions tropicales, seraient transformés en blocs compacts recouverts pendant l'été d'une couche d'eau liquide d'épaisseur variable mais toujours faible. La vie animale et végétale y deviendrait impossible. Ils cesseraient d'être les régulateurs du débit des fleuves dont les débordements ravageraient les bassins, l'économie entière de la portion continentale du globe serait changée.

La glace elle-même, soumise à des variations de température, augmente de volume si la température augmente, se contracte au contraire dès que la température s'abaisse. Son coefficient de dilatation cubique est d'environ 0,000159 et son coefficient de dilatation linéaire de 0,00006426 environ, ce qui signifie qu'une barre de glace ayant exactement 1 mètre ou 1000 millimètres de longueur à — 10 degrés, par exemple, mesurera 1 000,06426 millimètres à — 9 degrés et seulement 999,999935 millimètres à — 11 degrés. C'est environ le double de la dilatabilité du plomb et du zinc. Ces quantités infiniment faibles, en apparence, prennent pourtant une importance extrême dans les régions polaires où les variations de température auxquelles sont soumises les glaces dépassent souvent une cinquantaine de degrés et s'exercent sur des longueurs considérables. Il en résulte des tensions violentes qui donnent lieu à des ruptures des champs de glace, à des fendillements, à des fissures ; elles sont accompagnées de détonations et provoquent de véritables bouleversements qui constituent l'un des plus grands parmi les terribles dangers qu'ont à affronter les expéditions polaires. Il faut encore remarquer que les valeurs indiquées sont des moyennes et sont attribuables à la glace d'eau pure. Elles varient avec la teneur en sels de l'eau se congelant, c'est-à-dire avec les diverses eaux de mer et il en résulte, ainsi que nous le verrons plus loin, que les phénomènes de fissuration et de rupture n'en sont alors que plus exaltés.

M. Pettersson a en outre observé qu'au voisinage du point de fusion, le coefficient de dilatation diminue et même change de signe vers — 0,25, de telle sorte que la glace se contracte alors tout comme l'eau liquide dont le volume à 0° est moindre que celui de l'eau solide à la même température. En d'autres termes, le maximum de volume se manifeste à une température d'autant plus basse que l'eau est plus chargée de sels. On a reconnu qu'il se produisait entre — 0,15 et — 0,03 pour des glaces d'eaux absolument pures, jusqu'à — 14 et même — 20 degrés pour des glaces d'eau très riches en sels. On s'explique ainsi le ramollissement éprouvé par la glace d'eau de mer bien avant d'avoir atteint la

température de sa fusion. Une autre conséquence de la variation de toutes ces variables, d'après la salure de l'eau, est que dans un même pack, pour une même température, selon les endroits, il se fera des augmentations de volume ou des contractions. C'est là une des causes principales des grincements, des bruits spéciaux qui, avec les autres bruits provenant des chevauchements des diverses parties du champ les unes sur les autres, des chutes de blocs en équilibre plus ou moins instable et subitement renversés par l'apparition des fissures, font un fracas qui retentit presque continuellement aux oreilles des navigateurs et dont un long séjour dans les régions polaires parvient seul à atténuer l'épouvante.

La diminution de densité correspondant à l'augmentation de volume éprouvée par l'eau en se transformant en glace produit des effets considérables dans les contrées polaires. Elle cause la rupture du front des glaciers parvenant jusqu'à la mer et dont l'extrémité, soulevée par l'eau, donne naissance aux icebergs. Elle explique la flottaison de ces mêmes icebergs, l'énorme disproportion de leur volume émergé visible et de leur volume immergé invisible, enfin la facilité de leur transport par les courants marins et par les vents qui les amènent dans des parages souvent très éloignés de leurs localités d'origine. C'est à elle qu'est due l'intense destruction des roches dont les pays froids sont le théâtre. Si l'on voulait peindre d'un mot le caractère le plus frappant des régions polaires et surtout subpolaires comme le nord de la péninsule Scandinave, Terre-Neuve, le bas Labrador et même le Spitzberg, il suffirait de dire qu'elles sont le pays des roches détruites par la gelée. Il en résulte mille conséquences aisées à prévoir. Les sommets montagneux sans cesse éclatés offrent aux regards des aiguilles, des arêtes vives qui ont valu au Spitzberg le nom qu'il porte, la terre des montagnes pointues. Partout au pied des escarpements abrupts et quelquefois jusqu'à moitié de leur hauteur, s'accumulent d'énormes amas d'éboulis que Scoresby a décrits en savant et en artiste. A Terre-Neuve, ces débris voisins de la côte, grâce au jeu des marées, sont chargés sur les glaces côtières, entraînés au large et charriés

par les courants froids jusqu'au moment où, parvenus au contact d'eaux plus chaudes, leur support ne tardant pas à se fondre, ils tombent sur le fond à peu près tous au même endroit. Les bancs de Terre-Neuve, n'ont pas d'autre origine. Ces phénomènes s'accomplissaient déjà aux époques géologiques anciennes. La preuve en est dans la présence des nombreux et volumineux cailloux dont le facies glaciaire ne saurait faire l'ombre d'un doute et que ramène la drague par des profondeurs même assez grandes au large de Brest, près du banc de la Chapelle par exemple. Ils viennent évidemment de régions septentrionales de l'Europe alors en pleine période glaciaire et comparables, comme état général, aux contrées polaires actuelles. Ils impliquent donc, pour cette époque si reculée l'existence de courants froids descendant du nord au sud et de courants chauds ayant probablement une direction perpendiculaire dont on pourra déduire la position car elle a toutes chances de ressembler à celle des courants du Labrador et du Gulf-Stream et aux bancs de Terre-Neuve par rapport à l'île elle-même. Pour élucider ce problème de paléogéographie, il suffira de multiplier les dragages, de pointer leur position sur la carte et d'identifier, s'il est possible, les roches récoltées au fond de l'eau avec des roches probablement anglaises.

La glace, loin d'être un corps rigide est au contraire plastique et susceptible, pourvu que la pression soit suffisante, de se mouler comme de l'argile. En remplissant de glace concassée les deux moitiés d'un moule en bois et en soumettant à la presse hydraulique, on obtient une lentille de glace parfaitement homogène et limpide. Cette propriété expliquera toutes les particularités des glaciers, fleuves de matière plastique telle que le serait une boue extrêmement épaisse et dont les caractères, à la viscosité près, sont identiques à ceux des fleuves d'eau liquide. L'illustre sir William Thomson a réussi à reproduire synthétiquement la plupart d'entre eux, dans son laboratoire de Glasgow, au moyen d'une nappe de poix de cordonnier glissant lentement le long d'un conduit en planches et supportant des bouchons qui en suivaient les mouvements diversement modifiés de manière à imiter les circons-

tances naturelles, modifications de la pente, étranglements ou élargissements du lit et d'autres encore.

On a cherché à expliquer de diverses façons cette plasticité si remarquable. Les uns l'ont rapprochée des propriétés des demi-fluides visqueux dont les molécules sous pression glissent les unes sur les autres suivant des lois à l'étude desquelles se sont livrés Tresca et Daubrée. Une foule d'expériences ont montré que pour la glace, la plasticité ne se manifeste qu'au-dessus de — 10 ou — 12 degrés et est d'autant plus marquée que la température se rapproche davantage du point de liquéfaction. Ce point, pour un même échantillon de glace, est lui-même soumis à des variations dépendant principalement de la pression et de la présence de sels en plus ou moins grande quantité dans l'eau servant de matière constituante. Toutes ces particularités physiques, variables dans telles ou telles circonstances naturelles, permettent d'expliquer ce qui arrive dans chaque cas particulier.

Tyndall attribue ces phénomènes à ce qu'il nomme le regel.

Si l'on scie un morceau de glace et qu'immédiatement on rapproche les deux fragments l'un de l'autre, ils se soudent. Si l'on dépose sur un bloc de glace un fil de cuivre portant un poids de quelques kilogrammes à chacune de ses extrémités, le fil traverse la glace, finit par tomber à terre et cependant, comme la section s'est refermée à mesure qu'elle s'est faite, le bloc reste unique et aussi transparent qu'auparavant. Il s'est, dans ces deux cas, effectué un regel. La pression qui abaisse le point de congélation de l'eau est par conséquent capable de liquéfier en partie de la glace sans que sa température change. Aux points pressés par le fil une liquéfaction se manifeste. Le fil, franchissant l'eau produite descend et aussitôt après, au-dessus de lui, l'eau se congèle de nouveau puisque la pression a cessé de se faire sentir. Ces modifications de forme de la glace dont la nature montre tant d'exemples proviendraient non pas d'une plasticité c'est-à-dire d'une obéissance de la matière à la pression s'exerçant sur elle, mais d'une adaptation aux formes extérieures due à un double changement d'état provoqué par la pression et reconstituant l'état initial : trans-

formation de la glace en eau ayant pour conséquence une séparation du bloc solide et retransformation de l'eau en glace effaçant les effets de la séparation.

On a encore supposé que le point de fusion est plus élevé à l'intérieur d'un morceau de glace qu'à la surface à cause de la cohésion exercée sur une molécule intérieure par les molécules qui l'entourent et tendent à l'empêcher de changer d'état. Cette action n'existe évidemment pas à la surface. En outre, la glace solide, comme d'ailleurs tous les corps cristallisés, possède le pouvoir de provoquer la cristallisation c'est-à-dire la congélation de l'eau en contact avec elle et à la même température. Le regel serait ainsi expliqué.

Quelle théorie convient-il d'adopter ? Chacune rend compte des faits, chacune est plausible ; peut-être toutes deux sont-elles exactes ; peut-être toutes deux sont-elles inexactes ; peut-être encore certains cas dépendent-ils uniquement de l'une et certains autres de l'autre. La nature agit sans se soucier des explications. L'homme qui la regarde s'efforce de saisir les causes sans y réussir toujours et force lui est bien alors de se satisfaire avec des mots.

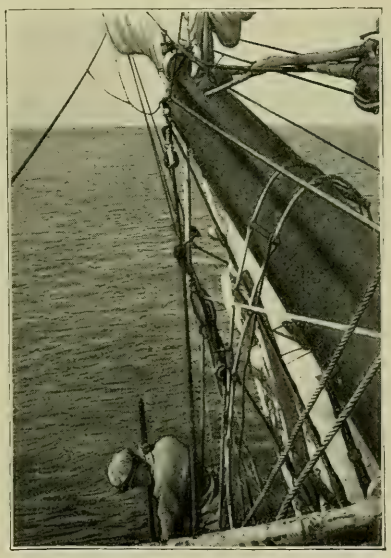
On avait longtemps admis que lorsque de l'eau de mer se congelait partiellement, la glace formée était constituée par de l'eau pure tandis que les sels se concentraient dans la saumure restante. Le phénomène aurait été d'un grand avantage pour les explorateurs polaires qui, pour leur alimentation, auraient toujours été assurés de se procurer de l'eau douce potable en faisant fondre quelques fragments de glace. L'eau de mer se serait dessalée par un effet physique. Il n'en est malheureusement pas ainsi. Les explorateurs ne l'avaient déjà que trop reconnu pratiquement avant que M. Pettersson ne se soit livré à une constatation rigoureuse à la suite de ses analyses des échantillons d'eaux de fusion de glaces rapportées par Nordenskjöld de son mémorable voyage à bord de la « *Véga* ».

Au moment de la congélation partielle d'une masse d'eau de mer composée d'une dissolution dans l'eau pure de divers sels, ceux-ci se partagent inégalement entre la portion solidifiée et la

saumure restée liquide. Les sulfates se concentrent de plus en plus dans la glace tandis que la saumure s'enrichit en chlorures. La forte proportion des sulfates expliquerait pourquoi certaines eaux de glaces marines, quoique sans saveur salée et bonnes au goût, indisposaient gravement les hommes qui en avaient bu. Il ne suffirait donc pas d'analyser ces eaux comme on l'a fait dans la plupart des expéditions polaires, au point de vue des chlorures, par un dosage à l'azotate d'argent, mais aussi au point de vue des sulfates par le chlorure de baryum. Ces effets de sélection sont sous la dépendance de la lenteur de la congélation et de la température à laquelle s'effectue celle-ci. En définitive, un fragment de glace d'eau de mer est une roche hétérogène comparable à une roche cristalline quelconque, un granite par exemple. Mais tandis que les éléments du granite sont des minéraux de composition différente, d'aspect différent et par suite immédiatement reconnaissables, la glace d'eau de mer se compose d'éléments différents, de nature chimique différente, cryohydrates solides de composition saline variable et en proportions variables selon les conditions dans lesquelles s'est effectuée la congélation. Ceux-ci offrant le même aspect extérieur, blanc et limpide, ne sont point discernables et leur ensemble manifeste l'apparence trompeuse d'un bloc compacte et homogène.

Il en résulte de graves conséquences au point de vue des phénomènes polaires. Tout d'abord les éléments de la glace salée étant de composition chimique différente, possèdent des propriétés physiques différentes et par suite des coefficients de dilatation différents. C'est pourquoi, soumis à des alternatives de températures aussi variables que celles qui ont lieu dans les régions polaires, ces éléments se dilatant et se contractant chacun à sa façon, tendent à se séparer mécaniquement les uns des autres, à se disjoindre et à provoquer ainsi la dislocation de la glace par des fissures et des fentes. Sur le lac de Constance dont l'eau est douce et dont la glace est par conséquent de constitution beaucoup plus homogène que la glace d'eau salée, il se fait en hiver des crevasses de 10 kilomètres de longueur sur une largeur de quatre à cinq mètres. La

LE CHALUT PLEIN EST AMENÉ A BORD



PÊCHE AU HARPON SOUS LE BEAUPRÉ

solidité, la dureté et la résistance d'une glace changent avec les conditions de sa formation. Ces relations probables méritent d'être l'objet des investigations des explorateurs qui, pratiquement, auront à prendre encore en considération dans leurs expériences, les gouttelettes de saumure restées liquides ou postérieurement solidifiées et mécaniquement mélangées à la glace.

Si les saumures isolées successivement et qui se mêlent aux eaux sous-jacentes au moment de la prise de la mer ont une composition variable, elles doivent influencer la disposition du coin thermique polaire. On désigne sous ce nom le retroussement en coin tournant son arête aiguë vers l'équateur, des couches marines isothermes de telle sorte que, contrairement aux lois thermiques habituelles des autres parties de l'océan où les couches possèdent une température décroissante depuis la surface jusqu'au fond, dans le coin, les couches froides sont intercalées entre les couches chaudes. Des sondages thermiques, après avoir témoigné en descendant d'un abaissement de la température, indiquent ensuite un brusque relèvement suivi de la diminution progressive rentrant dans ce cas général. Les explorateurs polaires auront à élucider sur place ce détail important de la circulation océanique et ils y parviendront peut-être en combinant les mesures thermométriques de l'eau, de la glace et de l'air à des dosages chimiques, probablement d'acide sulfurique plus particulièrement prompts, faciles et précis.

Une autre propriété importante de la glace est sa faible conductibilité thermique considérée comme 213 fois moindre que celle du cuivre. De même que la neige couvre le sol d'un manteau protecteur contre les atteintes du froid, la glace protège l'eau contre le refroidissement, l'empêche de se congeler et, par conséquent, d'accroître indéfiniment la croûte qui la sépare de l'atmosphère. On s'explique ainsi comment, dans les régions polaires, l'épaisseur de la couche de glace formée annuellement ne dépasse guère 2 mètres ou 2 m. 5; elle n'augmente plus ensuite, ce qui a permis de réfuter l'ancienne théorie des glaces paléocrystiques épaisses de 50 et 60 mètres. Ces fortes épaisseurs ne sont, en effet, qu'accidentelles

et proviennent le plus souvent de la superposition de glaçons projetés les uns sur les autres pendant les cataclysmes si communs dans ces contrées et cimentés par le regel ou par de l'eau de mer ayant jailli à travers les fentes et ensuite congelée.

On mentionnera encore comme jouant un rôle dans la nature, l'évaporation de la glace. Quelque basse que soit la température ambiante, Weyprecht a reconnu qu'un cube de glace exposé à l'air et préalablement mesuré et pesé, perdait par évaporation une notable partie de son poids.

Le repos absolu retarde la congélation. De l'eau parfaitement calme peut être amenée à une température très sensiblement inférieure à celle de son point de congélation sans se congeler. Elle se trouve alors en état de surfusion, mais dans ces conditions, le moindre ébranlement suffit pour qu'elle se prenne instantanément. Les marins sont souvent témoins du phénomène.

La circulation de l'océan, c'est-à-dire ses courants, dépend essentiellement des actions antagonistes de la chaleur des régions tropicales et du froid des rayons polaires. Ces deux actions sans cesse agissantes troublent continuellement l'équilibre qui, sans elles, tendrait à s'établir dans la masse des eaux. Un tel équilibre serait l'immobilité, c'est-à-dire la mort ; sa rupture est le mouvement, c'est-à-dire la vie. Il importe donc maintenant de récapituler les conditions générales qui font des régions polaires et tropicales les centres d'activité du froid et du chaud, en d'autres termes, d'indiquer la répartition des climats sur l'étendue de la planète.

La terre est un globe qui, dans le cours d'une année, accomplit autour du soleil une trajectoire elliptique dont le plan est celui de l'écliptique. Le soleil occupe l'un des foyers de cette ellipse. Le globe est, en outre, doué d'un mouvement de rotation achevant en une journée un tour complet autour de son axe passant par les deux pôles, non perpendiculaire au plan de l'écliptique avec lequel il fait un angle de 23° 27′ 21″ et conservant cette inclinaison sensiblement pendant le cours entier de la rotation autour du soleil. L'inclinaison de l'axe terrestre provoque les différences d'éclaire-

ment et d'incidence des rayons solaires qui donnent naissance aux divers climats.

En effet, si l'axe était perpendiculaire, la terre serait chaque jour et pendant toute l'année également éclairée sur tout un hémisphère en même temps, la séparation de la lumière et de l'ombre aurait continuellement lieu suivant un méridien et, la puissance de l'échauffement ainsi que sa durée ne se modifiant point, les saisons et les climats proviendraient uniquement de l'incidence plus ou moins oblique des rayons solaires tombant sur la surface terrestre.

Cependant, par suite de l'inclinaison de son axe sur l'écliptique, le globe tourne en quelque sorte obliquement et les jours varient de longueur. De l'équateur au pôle, chaque petit cercle de la sphère est éclairé pendant une durée différente en relation avec la position du globe sur l'écliptique et le rapprochement plus ou moins grand de ce petit cercle de l'un ou de l'autre pôle. De l'équateur aux cercles polaires arctique et antarctique, à une distance angulaire de 23° 27′ 21″ du pôle, c'est-à-dire à la latitude géographique de 66° 22′ 39″ nord et sud, nulle part une durée de vingt-quatre heures ne s'écoulera sans qu'elle ne soit partagée en une période courte ou longue d'éclairement ou jour et une période d'obscurité ou nuit. Depuis le cercle polaire jusqu'au pôle, il en sera différemment. Pour la calotte arctique, le pôle lui-même restera éclairé pendant six mois sans interruption, de l'équinoxe du printemps à l'équinoxe d'automne en passant par le solstice d'été et pendant le même temps, le pôle antarctique demeurera plongé dans la nuit, De l'équinoxe d'automne à celui du printemps, en passant par le solstice d'hiver, le pôle nord restera continuellement dans les ténèbres, tandis qu'au contraire le pôle sud demeurera à son tour sans interruption lumineux. Aux cercles polaires mêmes, on aura une fois par an une seule nuit et un seul jour de vingt-quatre heures, sur le cercle arctique au moment du solstice d'été et, pour le cercle antarctique, au solstice d'hiver. Privées si longtemps des rayons du soleil et, pendant leur jour de six mois, éclairées seulement par des rayons obliques jusqu'à être tangents, ces calottes seront de véritables réceptacles de froid.

Un tel état se rapporte à ce qui se passe aujourd'hui, mais d'autres mouvements du globe, la précession des équinoxes ou déplacement dans l'espace de la ligne des équinoxes, intersection du plan de l'équateur terrestre avec celui de l'écliptique, la nutation qui produit une oscillation dans l'obliquité de l'écliptique, l'excentricité variable de l'orbite terrestre et d'autres variations des éléments astronomiques changent incessamment quoique très lentement les conditions de la distribution de la chaleur et de la lumière sur le globe. Ces variations, sans influence sensible, s'il ne s'agit que de périodes relativement courtes comme celle des temps historiques, se sont certainement produites pendant l'immense durée des temps géologiques de sorte que l'on est fondé à admettre que la répartition de la chaleur et de la lumière sur le globe n'a pas toujours été et ne sera pas toujours ce qu'elle est aujourd'hui.

Les deux calottes arctique et antarctique n'offrent même pas, quant à la durée de leur éclairement respectif, une symétrie complète, l'une n'est pas éclairée exactement pendant le même temps que l'autre est dans l'obscurité. Il existe en faveur de l'hémisphère nord une légère différence due à des causes dans l'étude desquelles nous n'avons pas à entrer.

On en dirait autant de l'influence de la chaleur centrale sur la surface de la croûte terrestre et qui est sensiblement nulle. En Sibérie le sol, à quelques mètres de profondeur, demeure continuellement gelé et un puits foré à Irkoutsk et poussé jusqu'à 116 mètres n'a pas quitté le sol gelé. Le soleil seul possède donc une influence pratique sur l'établissement des climats, abstraction faite, bien entendu, des conditions topographiques.

Les observations thermométriques prises plusieurs fois par jour et durant de longues suites d'années dans les divers lieux du globe ont permis d'établir des moyennes de températures diurnes, mensuelles ou annuelles. Celles-ci étant reportées sur des cartes, on a relié par des lignes, dites isothermes, l'ensemble des localités de même température. En ces sortes d'études, l'usage des cartes qui parlent à l'intelligence par les yeux et montrent graphiquement la continuité des phénomènes, l'emporte de beaucoup sur les tableaux

de chiffres où apparaissent mal les lois et dont la véritable utilité consiste à servir à confectionner des courbes. La plus haute température moyenne annuelle est de + 30°, les plus basses sont de — 17,5 en Sibérie, près de la petite ville de Verkhoïansk, et de — 20 par 75° environ de latitude nord, au milieu des terres arctiques du nord de l'Amérique. Il y a donc deux pôles de froid, Mais ces valeurs ne sont que des moyennes. Les écarts réels de température sont bien plus considérables et ils ont beaucoup plus d'importance quant aux phénomènes qu'ils provoquent dans les régions polaires. On les a figurés aussi sur des cartes. Ils atteignent jusqu'à 132 degrés si l'on considère le globe entier où l'on a constaté + 56° à l'ombre, à Mourzouk et — 76 à Verkhoïansk; ils arriveraient même à 114 à ce pôle même de Verkhoïansk, de + 38,8 à — 76 si cette température est bien réelle. Sous l'influence de ces froids terribles, tout se congèle, le sol ne dégèle d'ailleurs jamais et l'océan se recouvre d'une couche de glace heureusement peu conductrice, de sorte que son épaisseur ne s'augmente pas indéfiniment. Parry raconte que pendant l'un de ses hivernages, un commencement d'incendie se déclara à bord de son navire dans la chambre où étaient conservés les instruments. Pour sauver une petite boussole d'inclinaison, un matelot se précipita, la saisit de ses mains non gantées et l'emporta au dehors où il la tint pendant un quart d'heure environ. Quand il voulut la déposer, les doigts du malheureux étaient collés au métal brûlant comme un fer rouge à force d'être froid; il fallut lui en couper trois. La calotte arctique subit des écarts de température notablement plus considérables que la calotte antarctique à la fois plus froide et plus régulière dans les différences de l'été à l'hiver. La première est semée de nombreuses îles maritimes; la seconde est continentale. Or la mer qui, dans les contrées chaudes et tempérées, agit comme un régulateur de température, joue au contraire, un rôle perturbateur du climat dans les contrées polaires. Dans l'une, parcourue par des courants réguliers, surtout par le Gulf-Stream, la température s'élève davantage lorsque les courants agissent et que la mer est libre; elle baisse aussi davantage quand toute sa surface s'est trans-

formée en une immense plaine glacée. En revanche, la débâcle y est assez irrégulière et d'avance, le navigateur ignore, jusqu'où, à une époque déterminée de l'année, dans chaque endroit, la banquise lui permettra d'avancer avec son navire. Le climat de la calotte antarctique offre plus de régularité; nul courant chaud ne balaie ses côtes massives et les glaces qui s'en détachent en été et dérivent vers le nord laissent mieux prévoir jusqu'à quelle latitude elles s'avanceront vers l'équateur.

L'écart de température produit une foule d'effets dont l'ensemble communique aux régions polaires leur aspect particulier. Celui qui frappe le plus dans les régions polaires continentales est l'effroyable puissance de la désagrégation des roches par la gelée. On en connaît maintenant les motifs : porosité des roches qui absorbent les eaux de fusion des glaces pendant la courte durée de l'été, congélation, éclatement par la dilatation de l'eau remplissant les pores et détachement au moment du dégel suivant des fragments qui roulent sur les pentes et s'entassent au pied des falaises en amoncellements prodigieux. Mais cette action, puissante dans toutes les contrées polaires est surtout énergique dans les contrées subpolaires où les alternatives de gel et de dégel sont encore plus fréquentes. En Norvège elle saisit plus que tout le reste le voyageur; elle cause la désagrégation des côtes de l'île de Terre-Neuve dont les débris sont charriés par les glaçons jusqu'aux bancs où ils sont abandonnés à la suite de la fusion. Lorsqu'ils sont visibles, ces débris mêlés à ceux qui constituent les moraines des glaciers forment en grande partie ce qu'on nomme la banquette glaciaire. Ils offrent la couleur grise, bleu grisâtre ou noire des roches soumises aux intempéries et sur laquelle tranche, par places, généralement dans les fonds, la couleur jaune rouge des dépôts ocreux des produits argileux chargés de fer suroxydé provenant de la décomposition chimique des roches, boue fine charriée par les torrents résultant de la fonte des neiges et des glaces et abandonnés ensuite dans les parties basses des vallées. Le coloris des régions polaires est caractéristique. Alternant avec les dépôts ocreux s'étendent de vastes tourbières, des dépôts

d'humus, boue noire de nature organique. Pendant le court été, la végétation est relativement abondante, des mousses, des hypnum, des sphaigues, des lichens naissent et se hâtent de couvrir le sol. La sécheresse du climat due à la basse température d'hiver s'oppose à la décomposition des matières végétales qui se rassemblent dans les dépressions. Les débris animaux sont aussi bien conservés que les débris végétaux. Les cadavres retrouvés après de longues années des malheureux qui ont succombé au froid et à la faim au Spitzberg et à la Nouvelle-Zemble, semblaient à peine morts de la veille. Dans certains endroits, la fiente des innombrables oiseaux qui fréquentent ces parages crée des couches de guano et, sur les bords de la mer, les côtes faisant face aux courants marins sont jonchées d'énormes quantités de bois flottés amenés de lointains pays, des régions tropicales ou des forêts sibériennes, apportés à la mer par les fleuves puis poussés par les courants et qui s'enchevêtrent, ne conservant que leurs grosses branches dépouillées d'écorce, d'un blanc argenté et absolument polies. Telles s'offrent aux regards les contrées polaires et pourtant malgré leur désolation, grâce à la vigueur qu'elles communiquent au corps et à l'âme de ceux qui les visitent, elles exercent une véritable fascination. On les aime d'un âpre amour, car on s'y sent vivre d'une vie intense; on s'y enivre d'air, de lumière, de silence, de grandeur et de liberté; on les quitte presque toujours à regret et l'on y revient avec joie, oublieux des dangers courus, désireux d'en courir de nouveaux dans l'assurance qu'on les surmontera quels qu'ils soient. L'homme y sent son humanité exaltée. Quiconque a navigué une seule fois sur ces mers cherche à y retourner ou, si cela lui est impossible, il soupire à leur souvenir et pourtant tout y est à craindre, le froid, les tempêtes, la brume, la neige, l'emprisonnement par les glaces, l'obscurité, la disette, la maladie, les souffrances morales de l'isolement et l'écrasante monotonie de l'existence.

L'eau à l'état de vapeur brusquement solidifiée par le froid, comme cela a lieu pour l'humidité atmosphérique, prend l'état de neige, assemblage de très petits cristaux à formes infiniment

variées quoique conservant toujours la disposition hexagonale correspondant au système cristallin qu'affecte l'eau cristallisée. Le capitaine baleinier Scoresby, auteur de deux volumes, véritable encyclopédie de tout ce qui concerne les régions polaires, description fidèle et précise des phénomènes de la terre et de la mer, mesures rigoureuses, expériences remplies d'ingéniosité, observations nettes et intelligentes, renseignements complets sur les sujets les plus divers, histoire, statistique, commerce, pêche à la baleine, informations sur la faune terrestre et marine, n'a pas manqué de s'occuper des flocons de neige. Il en a dessiné un nombre considérable de formes, mais il avoue n'avoir pas réussi à trouver les lois de leur formation qui doivent évidemment dépendre de la température ambiante au moment même de leur création. Ces lois sont encore inconnues. Sera-t-il donné à quelque savant ou à quelque futur explorateur de les découvrir? Il faudrait pour cela pouvoir observer les flocons non pas près du sol mais dans les hautes régions de l'atmosphère où ils prennent naissance. Peut-être même serait-il plus sûr d'essayer de procéder synthétiquement. Le poids de la neige tombée est, à ce qu'on prétend, d'autant plus léger que le froid est plus intense; sa densité varie entre 0 1694 et 0,0402; elle dépend de l'état hygrométrique, de l'épaisseur de l'amas d'où l'on a retiré l'échantillon, de leur dimension, de la rapidité de la chute et du tassement. La neige tombe à peu près à toutes les latitudes et même par les plus froides températures car on en a vu à Yakoutsk alors que le thermomètre marquait — 46°. Elle donne parfois lieu à des tempêtes terribles qu'on nomme *blizzards* aux États-Unis. Accumulée sur le sol, elle s'y conserve tant que la température ambiante est inférieure à zéro. On s'explique donc aisément que, à toutes les latitudes, existe une limite des neiges dites persistantes, lignes d'équilibre idéal marquant les localités où l'apport de la neige est exactement compensé par son ablation sous les influences extérieures. Cette ligne dépend de l'altitude et de la latitude. Tandis qu'elle atteint 6 600 mètres d'altitude au Karakorum, elle arrive à peu près au niveau de la mer aux latitudes élevées. Cependant cette division qu'indique le simple bon

sens, éprouve d'assez grandes variations, car elle est sous l'influence d'une foule d'autres variables quelquefois très différentes en des localités pourtant assez rapprochées. Plus basse du côté de la mer que du côté de la terre, plus élevée à mesure que, sur l'ancien continent, on avance de l'ouest vers l'est, dans les régions sèches que dans les régions humides, elle est encore modifiée par certaines données topographiques et météorologiques, l'éclairement, l'orientation du terrain, la précipitation atmosphérique et jusqu'à la pente même du sol car les amas de neige glissent et disparaissent des flancs des montagnes très escarpées.

Il existe trois sortes de glace : la glace d'eau douce, d'eau de mer et celle des glaciers. La neige, forme spéciale de l'eau congelée, est la matière première de la glace des glaciers.

Quand la neige tombe en grande abondance dans une région située en amont de la limite des neiges persistantes, elle s'accumule en masses dont l'épaisseur augmente de plus en plus, surtout si la topographie du lieu s'y prête, c'est-à-dire si le terrain forme une sorte de cuvette plus ou moins vaste. Les couches inférieures comprimées par le poids des couches qui les recouvrent, augmentent de densité. A l'état de neige, elles pesaient à peine 100 kilogrammes au mètre cube et maintenant, grâce à cette compression, leur poids va augmenter jusqu'à atteindre 500 kilogrammes pour le même volume et elles se transforment petit à petit en une masse incomparablement plus compacte quoique encore loin d'être absolument massive car elle contient beaucoup de bulles d'air qui la rendent blanche, opaque et lui donnent l'aspect et la texture de la boule de neige durcie que pétrissent les enfants entre leurs doigts. Ce passage intermédiaire entre la neige et la glace compacte porte le nom de névé. Le névé lui-même soumis à une pression plus forte encore, pénétré dans ses moindres interstices par de l'eau liquide suintant des étages supérieurs et ensuite congelée, deviendra plus compact car il se débarrassera peu à peu des bulles d'air disséminées dans sa masse, soit par remplissage de leurs cavités, soit par expulsion mécanique à la suite des compressions subies. Le névé augmentera de densité, tendra à peser environ

900 kilogrammes au mètre cube et prendra une couleur du bleu azur le plus pur. En définitive, dans la nature, existent toutes les transitions depuis l'état de neige en flocons jusqu'à celui de glace aussi compacte que du verre. Les faits sont élucidés par l'expérience synthétique qui permet de transformer en la comprimant, une poignée de neige en une lentille tellement transparente et limpide que Scoresby, au Spitzberg, a pu s'en servir pour concentrer les rayons solaires et allumer la pipe de ses matelots.

Lentement la neige qui augmente sans que rien la fasse disparaître puisqu'elle se trouve dans la région des neiges persistantes, va s'accumuler en amas de plus en plus épais et par conséquent de plus en plus pesants. L'épaisseur du névé, puis celle de la glace des couches inférieures augmentera donc continuellement. Si le cirque montagneux où elle est entassée présente une échancrure, la masse glacée finira tôt ou tard par en atteindre le niveau et, semblable à un vase trop plein qui déborde, grâce à sa viscosité, elle coulera au dehors et descendra sur la pente comme le ferait un fleuve au cours extrêmement lent quoique présentant atténuées les mêmes particularités qu'un fleuve liquide. La masse visqueuse descendra alimentée par l'apport continuel des neiges en amont jusqu'au moment et jusqu'à l'endroit où, la limite des neiges persistantes franchie, les conditions d'ablation par fusion et par évaporation l'emporteront définitivement sur l'alimentation par chute de neige. La température de l'air, le rayonnement solaire, les pluies chaudes, tout fera sentir son action et le fleuve glacé s'arrêtera brusquement, terminé par un front d'autant plus voisin du niveau de la mer que l'ablation se manifestera avec une intensité suffisante plus près de ce niveau. En d'autres termes, les glaciers qui se trouvent à toutes les latitudes, parviendront d'autant plus bas que la localité se rapprochera davantage du pôle, de telle sorte que dans les régions polaires elles-mêmes, au Spitzberg, à l'archipel François-Joseph, au Groenland, sur presque tout le pourtour de l'immense continent antarctique, leur front sera baigné par les flots. Alors se manifestera l'ensemble des phénomènes dépendant des propriétés connues de la glace. Tous sans exception seront

explicables ; on pourra même les prévoir. Tel est l'avantage d'une méthode rigoureusement scientifique. Quand les principes sont bien connus, il suffit de quelques exemples pour montrer qu'ils fournissent l'explication complète des faits. Il devient inutile de se perdre dans l'énumération et l'explication compendieuse des détails ; il importera assez peu d'en oublier ou d'en donner une description plus ou moins écourtée : décrits ou non décrits, aucun ne manquera d'explication et le voyageur, muni de son instruction rationnelle et systématique, mis en présence de la nature, ne s'étonnera d'aucun phénomène ; il les considérera tous comme autant de conséquences logiques et fatales de causes connues ; il lui suffira d'en appeler à son bon sens. La géographie n'est ni une énumération de noms, ni une œuvre littéraire, ni une dissertation ; elle est l'application directe, immédiate, brutale de principes scientifiques précis. C'est pour cela qu'un physicien sérieux, bien muni de connaissances physiques, chimiques et minéralogiques, est géographe même sans qu'il s'en doute.

Rien ne prouve mieux que les glaciers combien l'assertion est exacte.

Puisque la neige est visqueuse, un glacier est un fleuve ; des jalons disposés en ligne droite perpendiculairement à son cours ne tardent pas à perdre leur alignement et à marquer une ligne courbe concave vers l'amont. Sa vitesse n'est pas la même dans toute sa masse : elle est plus rapide au centre que sur les bords, dans les courbures concaves de son lit que dans les courbures convexes, sur les pentes fortes que sur les pentes faibles, à la surface qu'au fond, sur un sol uni que sur un sol raboteux. Tout est identique proportionnellement pour les fleuves liquides qui sont les cours d'eau et pour les fleuves visqueux qui sont les glaciers.

Comme la glace est en même temps visqueuse et cassante, partout où, sur le cours d'un glacier, la vitesse sera augmentée, il se produira des ruptures, des fentes, des crevasses, particulièrement nombreuses sur les bords, au-dessus des portions raboteuses ou convexes du lit et dans les concavités du parcours. Lorsque les blocs ainsi débités en énormes parallélipipèdes sont particulière-

ment abondants et entassés les uns sur les autres, on les nomme dans les Alpes des séracs. La fluidité se traduira par une structure veinée. Dans les fentes s'engouffreront les eaux de fusion superficielles qui formeront des moulins, des grottes, pour finir par constituer sous la masse même du glacier et si la température du climat le permet, un cours d'eau caché qui descendra en suivant la pente et s'échappera au dehors sur le front du glacier.

Comme l'eau augmente de volume en se solidifiant, les parois rocheuses du glacier tantôt mouillées, tantôt congelées, éclatent, s'éboulent et versent leurs débris à la surface de la glace. Une fois déposés, ils sont entraînés par la progression générale du terrain qui les portent et ils constituent les moraines latérales doubles pour chaque glacier puisqu'elles proviennent de ses parois droite et gauche. Par leur nombre, dans les parties basses, elles indiquent le nombre des glaciers affluents qui sont venus, semblables à des rivières, alimenter le cours principal. En effet, ce nombre des moraines diminué d'une unité est égal au nombre des affluents, puisque deux glaciers donneront trois moraines, deux latérales et une médiane constituée par les deux moraines l'une de gauche et l'autre de droite des deux glaciers juxtaposés ; trois glaciers affluents en produiront quatre et ainsi de suite. Toutes ces pierres descendront jusqu'au moment où, le glacier prenant fin, elles tomberont abandonnées pêle-mêle sur le sol véritable, tantôt plus loin et tantôt plus près selon les mouvements d'avancée et de recul de la glace, en donnant naissance à une moraine terminale. L'entassement des pierres se fera donc non pas en une ligne unique comme pour les moraines latérales, mais tout le terrain en avant du glacier sera semé de blocs, de cailloux arrondis, plus souvent à arêtes vives, offrant la plus grande variété de composition minéralogique, puisqu'ils sont les débris de toutes les roches limitant le cours du fleuve entier solide et de ses affluents. Le caractère glaciaire d'un amas de roches se reconnaît du premier coup d'œil et l'océanographie y trouve son utilité. Le long des rivages des pays froids, ces débris chargés sur des glaces côtières sont emportés par les courants jusqu'aux parages où, au contact d'eaux

chaudes, les glaçons servant de véhicules sont fondus et abandonnent leur chargement pierreux qui devient désormais un fond marin. Les bancs de Terre-Neuve montrent ce caractère. Ils se composent de menus débris de l'île enlevés chaque année par les glaces côtières et qui entraînés par le courant froid du Labrador vont se fondre au contact des eaux chaudes du Gulf-Stream. Ils sont une moraine marine d'un genre particulier. Un autre cas se rapporte à l'époque géologique dite glaciaire, celui des blocs que ramène la drague dans le golfe de Gascogne ou plutôt dans l'Océan Atlantique, sur le parallèle de Brest, vers les bancs de la Chapelle. Les pierres sont des quartz, des granites et des gneiss provenant des régions septentrionales à roches cristallines et les endroits où elles sont disséminées sont l'emplacement de ce qu'on appellerait volontiers d'anciens bancs de Terre-Neuve. Une conclusion en appelle d'autres. La carte de ces dépôts étant convenablement faite par points permettrait d'affirmer l'existence de courants marins chauds et de courants marins froids se rapportant à cette époque si reculée et, conjointement avec d'autres données, de reconstituer une géographie, une distribution des terres et des mers peut-être un peu différente de celle qui existe aujourd'hui dans ces parages.

La masse de glace d'un glacier exerce une énorme pression contre les roches de son lit; entraînant enchâssés avec elle des cailloux qui font l'office de burins, elle strie les roches, les polit et leur communique une forme arrondie, moutonnée rappelant les dos de moutons en troupeaux, serrés les uns contre les autres et bien caractéristique des régions anciennement ou récemment abandonnées par les glaces. Le résultat de ce polissage est une boue infiniment fine entraînée par les cours d'eau coulant sous la glace. Elle arrive avec eux à la mer au fond de laquelle elle se dépose non seulement dans les régions polaires elles-mêmes, mais probablement à de grandes distances et s'y mélange aux autres sédiments organiques et inorganiques. Le fond de la mer de Baffin en est uniquement constitué. Il en est sans doute de même pour la plus grande partie du bassin polaire arctique dont Nansen a mesuré la profondeur insoupçonnée et qui dépasse 3 200 mètres. Une

notable portion de l'argile sous-marine des grands fonds du large doit être d'origine glaciaire.

Les glaciers sont particulièrement abondants dans les régions arctiques; on en comprend le motif. Là seulement ils peuvent pousser leur front jusqu'à la mer. Ils sont surtout nombreux sur la côte ouest du Groenland où l'un d'eux, celui de Humboldt, a 111 kilomètres de large sur 90 mètres de hauteur, à pic sur la mer. Le Spitzberg en possède beaucoup ainsi que la terre François-Joseph. La masse glacée pénètre dans les flots, les refoule et continue sa marche sur le sol sous-marin, mais comme la glace, quelque compacte qu'elle soit, est plus légère que l'eau, il arrive un moment où la poussée l'emporte sur la cohésion : toute une portion est soulevée; il se produit une rupture. Les blocs se détachent avec un bruit terrible, roulent dans la mer en provoquant de violents remous et en soulevant autour d'eux d'énormes colonnes d'écume. Ils roulent plusieurs fois sur eux-mêmes et finissent par se calmer en prenant une position stable d'équilibre de flottaison telle que leur volume immergé et invisible est environ sept fois égal à leur volume apparent au-dessus des eaux. Chacune de ces montagnes de glace dérive sous l'action du vent qui la pousse par sa partie supérieure et plus encore par les courants marins qui agissent sur sa portion inférieure. Elle s'avance lentement vers le sud. A mesure qu'elle trouve des climats plus doux, des mers plus chaudes, elle se fond, diminue de volume, ce qui provoque des changements de forme et par conséquent d'équilibre; elle chavire, se retourne; des portions auparavant cachées apparaissent, d'autres portions autrefois visibles disparaissent; l'iceberg car tels sont le nom et la genèse de ces montagnes flottantes, se sculpte, se modèle et prend les formes les plus bizarres non pas en aiguilles plus ou moins déchiquetées et aiguës comme tant de fois il arrive de les dessiner aux artistes peu soucieux de représenter d'imagination des choses qu'ils n'ont jamais vues, mais arrondies et à contours adoucis. Leur effet est grandiose. Je n'oublierai jamais mon sentiment d'émotion à la vue du premier qu'il me fut donné de regarder de près. C'était un peu au sud du détroit de Belle-Isle, entre le Labrador

et Terre-Neuve. J'étais en bas; on me fit appeler; je montai et je demeurai stupéfait à l'aspect de cette gigantesque masse qui passait à un demi-mille à peine de nous dans la majesté de sa blancheur éblouissante se détachant sur le ciel chargé de nuées. Quelques places, peut-être couvertes de neige, apparaissaient d'un blanc mat et opaque. Les vagues avaient arrondi les parois contre lesquelles elles battaient et, à la lorgnette, dans des anfractuosités ou grottes creusées à son pied, on distinguait sa structure veinée, en bandes parallèles tantôt à demi-transparentes, tantôt limpides et teintées d'un azur pâle prenant en certains endroits une incroyable profondeur. L'iceberg avait une trentaine de mètres de hauteur. C'était le type de la pureté la plus immaculée ou plutôt c'était la pureté même. Des oiseaux s'étaient groupés sur son sommet; on eut l'idée de leur envoyer un coup de canon à projectile de combat. Je suivis des yeux le projectile décrivant sa trajectoire courbe et frappant l'iceberg. On espérait faire tomber des blocs de glace, provoquer peut-être un retournement. Il n'en fut rien. Les oiseaux surpris ouvrirent leurs grandes ailes, s'élevèrent de quelques mètres et reprirent leur place; d'autres se contentèrent dédaigneusement de les battre sans même prendre leur vol et l'iceberg tout blanc, indifférent à l'insulte des hommes, continua paisible et solitaire sa route vers le sud, vers les contrées du soleil où il devait s'anéantir. J'ai rencontré depuis cette époque beaucoup d'icebergs; une fois nous fûmes entourés par quarante-sept d'entre eux parmi lesquels plusieurs étaient échoués; j'en ai touché dont je faisais le tour en embarcation sans jamais oser y monter car leur surface est tellement polie et glissante que j'aurais infailliblement roulé dans la mer; j'ai examiné de très près leurs bandes blanches ou bleues, jamais je n'y ai observé le moindre caillou, la moindre poussière; jamais leur pureté n'a présenté trace de souillure. Les icebergs ne portent pas de pierres; s'ils en supportaient quelques-unes alors qu'ils faisaient partie du glacier, elles étaient à la surface et ont dû par conséquent être précipitées à la mer au moment de la rupture qui les transformaient en icebergs. Les transporteurs de débris minéraux sont les glaces côtières en tables

plus ou moins vastes mais peu épaisses qui se chargent des débris des roches baignées par les flots, sur le rivage. et surtout des galets qui forment le fond de la mer, par de faibles profondeurs, se collent à la face inférieure des glaçons, sont enveloppés et finalement emportés par eux. Plus tard, j'ai voulu aller étudier les glaciers de Suisse, la mer de Glace, le Grindelwald. Que les touristes me pardonnent ! J'ai cru voir les tas de neige malpropre et boueuse que les balayeurs ramassent dans nos rues au moment du dégel.

La marche des glaciers présente une vitesse variable. Leur front avance pendant un certain nombre d'années puis, pendant une autre période, il recule pour reprendre ensuite sa progression. Les causes de ces variations sont météorologiques et l'on comprend que pour les glaciers polaires arctiques ou antarctiques qui se déversent dans la mer, elles aient une influence considérable sur la quantité d'icebergs débités. S'ils sont abondants, leur fusion dans les régions tempérées donne naissance aux brumes épaisses si dangereuses pour les navires sur les bancs de Terre-Neuve ; ils refroidissent le Gulf-Stream qui lui-même, continuant sa dérive vers l'Europe, apporte un été froid et pluvieux. On ne saurait trop le répéter : tout se tient dans la nature et le phénomène en apparence le plus humble étudié consciencieusement, dans tous ses détails, de conséquence en conséquence, de cause en cause, entraîne derrière lui l'univers.

On prétend que certains icebergs ont une hauteur visible atteignant 100 mètres. L'évaluation me paraît exagérée. Ceux du continent antarctique sont tabulaires, en énormes plaques longues quelquefois de 15 ou 20 milles, terminées à pic par des parois verticales d'une cinquantaine de mètres de hauteur contre lesquelles les immenses vagues de l'océan glacial du Sud, arrêtées brusquement dans leur course, bondissent et se réduisent en embruns qui ressemblent à de la fumée. Quelquefois de leur base qui s'enfonce profondément sous les eaux, ils raclent le fond et s'échouent. Alors, quand on s'approche d'eux, on entend sortir de leur intérieur un grésillement continu, mille et mille décrépitations dont chacune résulte d'une bulle d'air qui fait éclater les parois de sa prison de

GLACIER SMITH (BAIE RED, SPITZBERG) VU PAR DESSUS
(Cliché provenant des Collections de S. A. S. le Prince de Monaco.)

glace. Il arrive même que des icebergs, dans un état particulier de tension, se pulvérisent instantanément comme une gigantesque larme batavique.

Nous avions admis comme origine ou source des glaciers une cuvette montagneuse servant de réceptacle à la neige, lui permettant de se transformer par la pression en névé et ensuite en glace et munie d'une brèche latérale par où cette glace sort et commence son cours le long des pentes. Il n'en est pas toujours ainsi et l'on comprend aisément que si la nappe de neige est suffisamment étendue sur une vaste surface formant plateau, l'accumulation et la compression pouvant se produire, il en sera de même de tous les phénomènes qui en sont la conséquence. Le cas se présente au Groenland ainsi que sur le continent antarctique. Il donne naissance à l'inlandsis, nappe de glace continue, glacier unique ayant près de trois fois la superficie de la France et bien connu depuis la mémorable traversée de Nansen en 1888. Avant lui Nordenskjöld l'avait étudiée mais il n'y avait poussé qu'une pointe hardie et n'avait point réussi à la traverser. Débarqué après mille dangers sur la côte est, après avoir franchi une mince bordure de rochers et de tourbières, Nansen trouvait la nappe glacée et, avec ses compagnons, il se dirigeait vers l'ouest. Le voyage dura quarante cinq jours. La nuit, on couchait sous la tente ; pendant la journée, chaussé de ski, on demeurait attelé aux traîneaux. On eut à supporter des températures extrêmement basses et pourtant, lorsque parfois le soleil brillait, là où parvenaient directement ses rayons, le thermomètre marquait jusqu'à + 31°, tandis qu'au même moment, au même endroit, mais du côté de l'ombre, le mercure s'abaissait jusqu'à — 30. La nuit, la température descendait à — 40° et — 50°. Près de la côte ouest on rencontra quelques nunataks, pics rocheux élevant leur tête déchiquetée au-dessus de l'immense plaine. Tout près de la mer, la glace prit fin, séparée d'elle seulement par une étroite ceinture de marécages. L'épaisseur de la glace fut évaluée de 1 600 à 1 900 mètres. Ainsi que l'avait vu Nordenskjöld, sa surface coupée de fentes profondes tantôt béantes et tantôt recouvertes d'un mince pont de neige, sillonnée pendant

l'été de ruisseaux souvent assez considérables pour se transformer en rivières, est toute semée de cavités grandes ou petites dues à la présence d'algues de couleur brunâtre ou d'une poussière nommée cryoconite constituée par de la boue glaciaire desséchée, débris chassés par le vent des roches exposées aux intempéries. Ces matières, grâce à leur couleur sombre, absorbent les rayons solaires et provoquent la fusion de la glace qui les entoure. Tout le continent antarctique est recouvert d'une nappe d'inlandsis, débordant par endroits sur la mer qui en brise le front en donnant naissance à un mur vertical que Ross a mesuré du haut des mâts de son navire et dont il a estimé la hauteur à 45 mètres. Il s'en détache d'énormes icebergs tabulaires antarctiques coupés par des parois abruptes qui se distinguent des icebergs arctiques aux formes bien plus contournées.

La glace d'eau douce et celle d'eau de mer diffèrent assez notablement de la glace de glaciers.

La glace d'eau douce qui se forme sur les lacs et sur les rivières, au lieu d'être poreuse comme la glace de glaciers, est compacte, transparente, dure et très résistante. Amenée à la mer par les fleuves sibériens, elle constitue un des plus grands dangers de la navigation dans les parages si dangereux des côtes asiatiques de l'océan arctique. Presque invisible dans l'eau, elle se présente en larges dalles qui dépassent à peine la surface de la mer et sont à chaque instant balayées par les vagues ce qui augmente encore la difficulté que l'on éprouve à les distinguer de loin, de sorte que si un navire en marche les heurte, elles risquent de lui faire de graves avaries. La glace des lacs est d'un intérêt secondaire en océanographie. La débâcle des cours d'eau de la Sibérie et de l'Amérique du nord a lieu au printemps ; les glaces arrivent jusqu'à la mer de Kara ; chassées par les coups de vent elles s'entassent sur les rivages de la Nouvelle-Zemble où elles déposent par le dégel, en un talus presque ininterrompu, les pierres et les boues dont elles sont chargées.

La glace de mer est une troisième variété.

Un vaisseau vogue à travers la mer polaire, plutôt un voilier

qu'un vapeur dont le mouvement de l'hélice introduirait une cause de trouble; le vent est tombé; il flotte à peu près immobile au milieu de l'eau calme; la température de l'air s'abaisse, elle dépasse le point de congélation et cependant, par surfusion, la mer reste encore liquide. Tout à coup, sous l'influence d'une légère commotion, une embarcation amenée et dont les avirons commencent à frapper l'eau, l'équilibre physique instable est brusquement rompu et la mer se transforme instantanément en une bouillie glacée dont la consistance est celle d'un sorbet et qu'on désigne sous le nom d'eisbrei. Le vent a sur elle peu d'influence et la matière pâteuse résiste à se former en vagues. Le navire la fend de son étrave mais sa consistance ne tarde pas à augmenter encore; les cristaux s'enchevêtrent les uns dans les autres; ils se massent, ils se transforment en glace élastique car elle obéit aux oscillations de la houle; la croûte s'épaissit, devient rigide; le bâtiment est arrêté; il est emprisonné, pris, *beset* comme le disent les Anglais.

Les termes employés pour désigner les objets ou les phénomènes polaires méritent de fixer un instant l'attention. Les premiers explorateurs en présence d'objets, de phénomènes nouveaux inventèrent pour eux des termes nouveaux et créèrent ainsi une langue spéciale. Comme ces explorateurs furent des Anglais, des Scandinaves ou des Autrichiens, leurs dénominations furent, elles aussi, anglaises, scandinaves et allemandes. Une seule, hélas! est française, le mot banquise qui signifie l'amas de glaces infranchissable au navire, est la glorieuse récompense du voyage de Dumont-d'Urville. Notre pays porte la peine de son inertie; le passé est passé et maintenant qu'il y a lieu de décrire en français les phénomènes découverts, décrits et étudiés par les autres nations, il nous faut prendre purement et simplement le parti d'adopter les termes choisis par les autres. Toute tentative de traduction aurait de fortes chances d'être inexacte, quelquefois ridicule, en tous cas inutile. Il serait puéril de chercher à inventer de toutes pièces des mots français nouveaux. Tout au plus nous est-il permis de simplifier une langue pour laquelle on a évidemment multiplié les termes plus qu'il n'était indispensable et de n'adopter, en les laissant ce qu'ils sont, que les

mots étrangers réellement nécessaires. Iceberg demi-anglais, demi-allemand pourrait être mieux choisi, mais il a pour lui qu'il est unanimement admis ; « inlandsis » est franchement scandinave et « eisbrei » allemand. Laissons à Scoresby, à Parry, à Ross, à Nansen, à Nordenskjöld, à Weyprecht la part de gloire qu'ils ont légitimement conquise, soyons beaux joueurs et puisque la partie est perdue par notre faute, adoptons loyalement leur terminologie toute cosmopolite qu'elle soit.

La mer est entièrement prise autour du vaisseau ; elle s'est transformée en un immense champ, le pack, qui s'étend à perte de vue de tous les côtés. Certains d'entre eux ont été longés pendant plus de 60 milles. Plus on s'avance vers le nord, plus leur étendue augmente. L'hivernage commence, les jours raccourcissent, le soleil s'élève de moins en moins au-dessus de l'horizon, il finit par disparaître pour plusieurs mois ; les coups de vent succèdent aux coups de vent. Sous l'action du froid qui contracte irrégulièrement la glace hétérogène, il se produit des fissures qui éclatent avec un fracas épouvantable, d'autres fois avec un bruit sourd et continu comme un gémissement qui n'aurait pas de fin. Le pack se découpe en morceaux énormes. Au souffle de la tempête, soulevés par la marée se faisant sentir régulièrement au-dessous d'eux, poussés par la dérive générale qui les entraîne tous en même temps, les glaçons se heurtent, se brisent, chevauchent les uns sur les autres, s'entassent en formidables amas, formant des monticules qu'on pourrait appeler des collines, car Greely en a vus qui atteignaient 240 mètres, déchiquetés, irréguliers, en « hummocks » qui après avoir hérissé la surface du pack d'obstacles presque infranchissables, sont retournés par un nouveau cataclysme, s'immergent et deviennent alors des « calves ». L'eau de mer jaillissant des fentes, saisie par des froids capables de congeler le mercure, se solidifie instantanément et cimente les glaçons. Le navire immobile subit d'effroyables pressions qui, il y a à peine quelques années, écrasaient ses flancs, quelque solide qu'en fût la construction, y disjoignaient les bordages, y pratiquaient des brèches par où pénétrait l'eau et il s'engloutissait comme la malheureuse *Jeannette* dans les parages

des îles de la Nouvelle-Sibérie. L'ingéniosité humaine est parvenue à vaincre ce danger; l'expérience du *Fram* a appris à construire pour ces navigations des bâtiments larges et courts — ce qui les rend il est vrai médiocres marcheurs à travers l'eau liquide, désavantage insignifiant — et à carène très arrondie de telle sorte que la pression de la glace, au lieu de se faire sentir perpendiculairement avec son irrésistible puissance, s'exerce obliquement et, au lieu d'écraser, se borne à soulever. Un navire ne craint plus maintenant de se laisser prendre; il brave les plus terribles mouvements de la glace. Son équipage bien muni de provisions, protégé contre le froid, attend la fin de l'hivernage et par les nuits étoilées, à la lumière argentée de la lune qui brille d'un extraordinaire éclat sur la blancheur immaculée du sol, il vaque à ses occupations scientifiques, assiste tranquille aux cataclysmes de la nature, contemple le chaos ou écoute le silence profond qui l'enveloppe.

En réalité, le pack, la banquise, n'est pas comme on pourrait le croire immobile au même point. Les observations astronomiques faites aussi souvent que possible à bord du navire, montrent qu'elle se déplace sans cesse. Nansen a la gloire d'avoir découvert la loi de ce mouvement de dérive dans les régions arctiques. Se basant sur la découverte au sud du Groenland de débris de la *Jeannette* naufragée au nord-ouest du détroit de Behring, sur le transport de bois flotté provenant de Sibérie et sur d'autres indices encore, il a été amené à conclure que sous l'influence du vent à laquelle venait se joindre celle du Gulf-Stream dont les dernières ramifications, après avoir frappé les rivages de la Norvège, se font sentir dans les mers de Barendsz, de Kara et jusque sur les côtes de la Sibérie septentrionale, les eaux de l'océan Arctique obéissaient à un vaste tourbillon passant par le pôle ou dans son voisinage, pour achever son cours par le nord du Spitzberg et aboutir au détroit de Danemark entre le Groenland et l'Islande. Les glaces suivent le mouvement des eaux et par conséquent le trajet qu'elles accomplissent en trois années environ est parfaitement déterminé. Un vaisseau construit sur le modèle du *Fram* n'aura plus qu'à répéter la manœuvre qui a si bien réussi; il poussera le plus loin possible

en eau libre jusque vers l'archipel de la Nouvelle-Sibérie, puis il se laissera saisir par le pack et, faisant corps avec lui, sera entraîné jusque dans le détroit de Danemark où se trouve l'eau libre. Tout le long du parcours, sans cesse changeant de place malgré son immobilité apparente, l'équipage se livrera à toutes les investigations océanographiques, météorologiques ou physiques que la science a si grande hâte de connaître pour ces régions.

Vers le centre de l'océan Arctique, la courte période de l'été est peu sensible; elle est plus puissante dans les portions plus périphériques. L'hiver prend fin, le soleil reparaît au-dessus de l'horizon, les jours augmentent, la nature s'éveille et se hâte de jouir de la vie, les oiseaux arrivent; par les fentes du pack qui se disloque, les phoques et les morses viennent respirer et se chauffer à l'air; les fissures s'élargissent, deviennent des canaux que peut maintenant suivre le vaisseau délivré de sa prison; les glaçons diminuent d'étendue et se transforment en « floes », ils sont entraînés par les courants, entrent dans des eaux plus chaudes qui les fondent; le dernier d'entre eux disparaît et les explorateurs joyeux voient devant leurs yeux se déployer la mer libre, la route du retour désormais sans obstacle.

Sous la croûte glacée, l'eau liquide se trouve dans un état thermique particulier. La glace mauvaise conductrice ne peut s'accroître indéfiniment; son épaisseur après un hiver entier ne dépasse pas deux mètres et demi. Soit que la mer se congèle, soit que la glace se fonde, des saumures variées de composition et de température se mélangent aux eaux sous-jacentes; les courants venus du sud y ajoutent leur action. Aussi la salure des eaux superficielles polaires est-elle des plus variables. Dans le Yougor-Char à des époques différentes, elle a passé de 27 à 35 pour 1 000. La forte salure autour du Spitzberg où elle atteint 33 pour 1 000, est due au Gulf-Stream; celle du détroit de Behring indique l'influence du Kuro-Sivo. Un peu au-dessous de la zone superficielle s'étend le coin thermique polaire, somme d'une foule d'influences diverses et, plus bas, commence la superposition régulière de l'océan par couches de plus en plus froides.

CHAPITRE XI

LES VAGUES ET LES MARÉES

La surface d'un liquide en repos dans un vase est parfaitement plane et de niveau. Abstraction faite de la courbure de la terre, il en est souvent ainsi dans un lac, surtout s'il est peu étendu, et quelquefois même en mer. La masse d'eau de l'océan est recouverte par la masse aérienne de l'atmosphère. Si l'une et l'autre sont en repos, la surface de l'eau est plane. Aussitôt que l'air se met en mouvement, comme il exerce une adhérence avec l'eau, il entraîne dans le sens de sa progression, une mince pellicule de liquide, la chasse devant lui et lui donne la forme d'un bourrelet en demi-lune, présentant sa concavité au vent, plus élevé en son milieu qu'à chacune de ses pointes et assez analogue aux dunes barchanes produites sur un autre fluide, le sable, à la surface de ces autres océans qui sont les déserts. Le vent continuant à faire sentir son action, chacune de ces dunes liquides minuscules se réunit à ses voisines et l'ensemble constitue bientôt une sorte de rouleau ou volute qui progresse dans le sens du vent, semble continuellement monter et descendre par rapport à un même point fixe et qui, grande ou petite, sur un lac ou sur l'océan, est une vague.

L'étude systématique des vagues a été commencée au début du XVIIIe siècle par Marsigli qui mesura leur hauteur dans diverses conditions, chercha à se rendre compte de l'action exercée par le voisinage du fond en pente douce ou abrupte, évalua leur vitesse en la comparant à celle du vent qui les pousse et attira l'attention sur leurs interférences. Franklin, vers 1772, reprit ce travail et fit

une partie de ses observations sur la pièce d'eau des Suisses à Versailles. Depuis lui, l'étude mathématique des vagues a été l'objet d'une quantité considérable de mémoires dus à d'éminents savants. Leur étude expérimentale théorique a été exécutée de la façon la plus simple et en même temps la plus nette, en 1825, par les frères Weber, les observations directes et systématiques à la mer par ceux dont le nom a été illustré par tant de découvertes en océanographie, Marsigli et plus tard Aimé. Grâce à tous ces efforts, la théorie des vagues est devenue simple. Dès qu'on la connaît, comme pour tous les autres phénomènes naturels, on a acquis les éléments du problème qu'on pourra dès lors essayer de résoudre dans chaque cas particulier, lorsque la complication n'en sera pas trop grande. Malheureusement trop souvent, on sera forcé d'avouer son impuissance; la connaissance des éléments du problème fera du moins savoir les motifs de cette impuissance. La plus claire des certitudes que donne la science à l'esprit humain aux prises avec l'infinie complexité des phénomènes de l'infinie nature est de lui faire savoir pourquoi il ne sait pas.

Accoudé sur le bastingage d'un navire, dans les mers tropicales, lorsque par temps de calme plat, sur le bâtiment immobile dont les voiles retombent inertes le long des mâts, le navigateur considère la mer, il la voit à intervalles de temps réguliers, monter et descendre en immenses colonnes horizontales. Semblable à un être humain qui respire, la vaste poitrine de l'océan se gonfle et s'abaisse tour à tour. C'est la houle dont les ondulations paraissent se poursuivre les unes les autres bien que, par une étrange contradiction, un objet léger jeté par-dessus bord et flottant à la surface, reste sensiblement à la même place, oscillant pendant des heures entières d'un mouvement pendulaire. La houle est le moument le plus simple que prenne la vague et, pour ce motif, il convient de l'examiner tout d'abord.

On distingue dans ces ondulations plusieurs caractéristiques. La vitesse, c'est-à-dire l'espace en apparence parcouru par chaque ondulation pendant l'unité de temps; la longueur ou distance comprise entre les crêtes de deux ondulations se suivant, la largeur

qui est l'étendue de la crête de chaque ondulation dans la direction perpendiculaire au sens du mouvement; la période, durée séparant le passage devant le même point fixe de deux points correspondants appartenant à deux ondulations successives, enfin la hauteur, distance verticale comprise entre le point le plus bas et le point le plus haut d'une même ondulation. Ces éléments doivent d'abord être mesurés avec autant de précision que possible et, selon la méthode générale, être ensuite repris par l'analyse et par la synthèse afin d'être connus isolément. On les étudie alors de nouveau dans la nature afin d'obtenir la vérification des lois découvertes analytiquement et synthétiquement et d'essayer d'apprécier l'influence réciproque des divers éléments dans le phénomène total.

Pour avoir la vitesse d'une vague, un observateur à bord d'un navire immobile mesure une longueur sur le pont et, muni d'une montre à secondes, note le temps que met un même point de la vague, la crête par exemple, à parcourir cet espace. Si le bâtiment est en marche, correction additive ou soustractive est faite selon la vitesse du bâtiment et l'angle compris entre la quille et le sens de la progression des vagues. Ces corrections ne présentent aucune difficulté.

La période s'évalue d'une manière analogue; l'observateur reste immobile et note sur une montre à secondes, la durée séparant le passage devant lui de deux crêtes successives. Comme précédemment, correction sera faite de la vitesse propre du bâtiment et de la direction suivie par lui par rapport à celle de propagation des vagues.

On mesure la longueur avec la ligne de loch qu'on laisse filer jusqu'à ce que la houache et l'observateur, à l'extrême arrière du bâtiment, se trouvent l'une et l'autre sur la crête de deux lames se suivant. La largeur des lames ne peut que s'apprécier à l'œil; du reste, des cinq caractéristiques, elle est celle qui offre le moins d'intérêt.

La hauteur est, au contraire, fort importante à connaître et en même temps assez incommode à mesurer. La méthode la plus simple consiste à s'élever dans la mâture jusqu'à ce qu'on puisse,

le navire étant au plus bas du creux, faire coïncider la crête de la lame avec l'horizon. On mesure alors la distance verticale égale comprise entre l'œil et la ligne de flottaison. Si deux bâtiments voguent de conserve, on peut encore, de l'un d'eux, repérer le niveau des lames sur la mâture du second. Rien n'empêcherait de se servir aussi du trace-vagues qui sera ultérieurement décrit; on a essayé sans succès d'employer un baromètre anéroïde très sensible.

Ces mesures sont, le plus souvent, entachées d'une foule d'erreurs. Sur mer, il est rare qu'il n'existe, au même moment, qu'un unique système de vagues; il y en a deux et parfois davantage qu'apprécie l'œil exercé du marin et qui communiquent au bâtiment un mouvement complexe de roulis et de tangage rendant assez difficile l'évaluation, même approchée, des éléments d'un système unique. On a peine à se faire une idée de la complexité de ces mouvements. Pour les figurer, on a suspendu au plafond, par un fil, dans l'axe du navire, un crayon chargé d'un poids suivant toutes les oscillations et en traçant la courbe sur une feuille de papier. Cette courbe est extrêment compliquée. Bien mieux, elle ne représente même pas les vrais mouvements du navire car l'inertie du poids indispensable pour charger le crayon et le transformer en pendule, exagère leur amplitude et modifie la courbe. Tous les appareils, mesureurs de roulis, mesureurs de tangage, basés sur le principe du pendule, devraient être fabriqués au moyen d'un pendule sans pesanteur, un rayon lumineux, par exemple. Des études intéressantes seraient à entreprendre dans cette direction.

La hauteur d'une vague est tout particulièrement difficile à apprécier. On l'estime toujours au-dessus de sa valeur réelle et, sans parler des poètes, gens excessifs par tempérament et par métier, il n'est guère de passager qui échappe à l'illusion et qui, après avoir subi le moindre mauvais temps, ne parle ensuite des vagues « hautes comme des montagnes » qui secouaient le bateau qui le portait. Ce qui prête surtout à l'erreur, c'est que le navire descendant dans le creux d'une vague et l'observateur fixant du regard,

devant lui la crête, évalue la hauteur par l'angle compris entre le rayon visuel dirigé de son œil à la crête et le plan du pont du navire qu'il suppose instinctivement horizontal. Or il est loin d'en être ainsi. Le pont est incliné puisque le navire descend la pente et l'angle très augmenté exagère démesurément l'évaluation.

Un grand nombre d'observateurs ont mesuré des vagues sur tous les océans et en particulier le lieutenant de vaisseau Paris. Il en a figuré des coupes qui surprennent tant la hauteur paraît faible et la longueur considérable. On n'aurait jamais pensé, même par sérieux mauvais temps, que la surface d'une mer aussi terrible fût en réalité aussi plate. Le *Challenger* n'a trouvé qu'une seule fois pendant ses trois années de croisière, des vagues de 7 mètres ; la *Novara* en a eu de 9 mètres et une fois de 11 mètres dans l'océan Indien ; les vagues de la mer du Nord ont rarement 4 mètres et celle de la Baltique 3 mètres. La longueur a été mesurée de 79 mètres pour une hauteur de 3,2 m. ce qui donne le rapport de 25 à 1 ; on a reconnu des longueurs comprises entre 300 et 400 mètres avec des hauteurs de 10 à 11 mètres. La vitesse varie entre 11 et 12 m. 5 par seconde soit 21 à 24 milles à l'heure. On se représentera mieux cette vitesse en se rappelant que 47 milles à l'heure c'est-à-dire 24 mètres par seconde correspondent à 87 kilomètres, vitesse d'un train express. En comparant la vitesse des vagues avec celle du vent, on a prétendu que ce dernier marche de 1 1/3 à 1 1/2 fois plus vite que les vagues qu'il pousse. Ce dernier point mériterait d'être mieux élucidé et il importe à la navigation puisqu'il permettrait d'évaluer d'avance, pour une région plus ou moins distante de celle où l'on se trouve et vers laquelle, peut-être, on se dirige, l'état probable de la mer, la force et la direction du vent. La question est l'une des rares susceptibles d'être étudiées à bord d'un navire en marche directe et rapide, comme un paquebot et il est à souhaiter qu'elle tente la curiosité d'un officier ou d'un médecin de marine ayant des loisirs à y consacrer. Les parages où se rencontrent les vagues les plus fortes et les plus régulières sont l'océan Antarctique, au sud du cap Horn et du cap de Bonne-Espérance. Toutes les conditions sont favorables : un

violent vent d'ouest y souffle d'une façon continue et aucune terre, aucune île n'en atténue la force ou ne brise les énormes vagues soulevées sur un espace en quelque sorte sans fin puisqu'il fait le tour entier du globe.

La plus simple manière d'étudier expérimentalement le mouvement des vagues consiste à se servir d'une auge à ondulations. Cependant remarquons qu'il s'agit d'étudier non pas la vague mais l'ondulation de houle. La langue française est pauvre en termes concernant la mer. Le pays n'a pas encore l'âme maritime et la langue est une fois de plus l'image de l'âme de la nation. Le français maritime abonde en équivoques. Combien de fois confond-on un haut-fond et un bas-fond ; il n'existe pas d'adjectif comme en anglais ou en allemand pour signifier une eau peu profonde et l'on est obligé d'employer une périphrase pour la désigner ; vases et boues sont synonymes ; on possède à peine des termes pour qualifier les divers accidents du relief sous-marin. On ne manquerait pas d'autres exemples. Le mot « vague » désigne à tort « l'ondulation », car les deux termes ont des significations très différentes ; la lame désigne indifféremment la vague et l'ondulation de houle. En réalité, la houle est une ondulation sans progression horizontale et la vague ou mieux vague forcée est une ondulation avec progression horizontale.

L'auge destinée à étudier les ondulations a été inventée par les frères Weber qui, dans un ouvrage excellent, aussi peu connu qu'il mériterait de l'être et digne de servir de modèle, ont su traiter simplement, clairement, en ne faisant guère appel qu'au bon sens, aux yeux et à des appareils élémentaires, les phénomènes si compliqués des vagues. Leurs travaux exécutés avant 1825, date de la publication de leur livre, devraient être repris non quant à leur fond ni à leur forme, mais en y appliquant les ressources d'un art ignoré de leur temps, la photographie instantanée.

L'auge consiste en deux lames de glaces verticales, parallèles, et à 2 ou 3 centimètres de distance l'une de l'autre, mastiquées dans un bâtis en bois. On remplit l'intervalle compris entre les deux glaces avec de l'eau ou tout autre liquide ; on y excite des

ondulations soit en soulevant l'auge par une extrémité et en l'abaissant brusquement pour produire un choc, ou bien en aspirant dans un tube une certaine quantité d'eau qu'on laisse ensuite retomber d'un seul coup, soit avec une palette qu'on agite rythmiquement au sein même du liquide, soit de tout autre façon. Pour rendre les phénomènes visibles, on met en suspension dans le liquide des grains solides de même densité, des fragments d'ambre, par exemple, si on expérimente sur de l'eau ou des boulettes de cire convenablement lestées s'il s'agit d'autres liquides et l'on observe à travers les lames de glaces ce qui se passe. Tous les éléments du problème peuvent être variés à volonté et aisément mesurés.

Lorsqu'un liquide supposé infini en profondeur et en étendue accomplit une ondulation, chaque molécule superficielle exécute un mouvement circulaire. La vague se propageant de gauche à droite, par exemple, la circonférence trajectoire de la molécule sera décrite dans le sens des aiguilles d'une montre et inversement dans le cas contraire d'une ondulation s'avançant de droite à gauche. Le mouvement s'effectuera suivant la moitié inférieure de la circonférence dans le creux de la vague de sorte que le mouvement de la molécule sera alors inverse de celui de la propagation, tandis que la moitié supérieure du cercle sera parcourue dans le sens même de la propagation sur l'étendue entière de la crête. L'ensemble est représenté par la courbe nommée trochoïde que les mathématiciens définissent comme étant celle décrite par un point situé sur un cercle roulant lui-même sur une ligne droite. Il ne se produit dans ce cas aucun mouvement de progression en avant des molécules ; chacune d'elles parcourt indéfiniment le même cercle, à la même place et avec la même vitesse.

Il en est ainsi pour une molécule immédiatement superficielle. A mesure qu'on considère des molécules situées de plus en plus profondément au sein du liquide, on constate que leur trajectoire circulaire s'aplatit de plus en plus, devient elliptique et se transforme progressivement en une ligne droite horizontale le long de laquelle chacune d'elles oscille de droite à gauche et de gauche à droite. Si la profondeur augmente encore, la petite trajectoire horizontale

diminuant toujours, finit par ne plus exister et la molécule reste immobile.

Le passage d'une trajectoire circulaire à une trajectoire elliptique puis rectiligne et finalement nulle, à mesure que la profondeur augmente, se fait d'une manière assez rapide. A une profondeur égale au dixième de la longueur de l'ondulation, c'est-à-dire à la distance séparant deux crêtes successives, l'axe vertical n'est plus que la moitié de ce qu'il était à la surface et de ce qu'est resté l'axe horizontal; à une profondeur égale à la moitié de la longueur, il est réduit aux 4/100, enfin à une profondeur égale à la longueur même de l'ondulation, il n'est plus que les 2/1 000. Les molécules se meuvent alors horizontalement dans le sens de la propagation de la vague dans la crête de celle-ci, en sens inverse dans le creux. Cette remarque est d'une application importante en télégraphie sous-marine car, sur le sommet de certaines montagnes sous-marines, les câbles reçoivent des molécules d'eau qui les baignent un mouvement de balancement et par conséquent de frottement sur le fond qui ne tarde pas à les couper. On prétend qu'il est impossible de poser un câble sur la crête Wyville-Thomson, au nord de l'Écosse parce que la mer y est toujours agitée, la profondeur de l'eau à peine de 1 000 mètres, et qu'à l'effet des vagues se superpose celui d'un fort courant qui chasse la vase et ne laisse subsister qu'un fond de gros gravier et de cailloux sur lequel s'usent rapidement les câbles comme s'ils frottaient sur une lime.

Il était important de savoir à quelle profondeur se propage le mouvement d'ondulations d'une hauteur donnée. Le problème intéresse encore la télégraphie sous-marine et sa solution est destinée à élucider une foule d'autres questions théoriques et pratiques. Si le fond est remué en un point de profondeur connue par des vagues de hauteur connue, la mer, chargée de sédiments, se troublera, changera de couleur et le navigateur aura chance d'être ainsi averti de l'approche de hauts-fonds. Un marin italien, le commandant Cialdi, s'est beaucoup occupé du problème et il en a fait le sujet d'un livre. Il cite de nombreux exemples pris dans les

journaux de bord. Les frères Weber ont procédé expérimentalement.

Pour cela, dans leur auge contenant de l'eau de mer, ils mettaient en suspension des fragments d'ambre ayant exactement la même densité que le liquide et qui, pour ce motif, constituaient en quelque sorte des molécules d'eau rendues visibles. Après avoir provoqué une ondulation de hauteur connue, ils suivaient avec un microscope dirigé perpendiculairement aux parois transparentes de l'auge le mouvement de l'ambre dont la profondeur au-dessous de la surface était facile à mesurer. Ils reconnurent ainsi que l'agitation se propage jusqu'à une distance verticale égale à 350 fois la hauteur de l'ondulation. On comprendra aisément, d'après ce chiffre, pourquoi certaines mers peu profondes comme la Manche et la mer du Nord où les plus petites vagues superficielles agitent le fond, ont constamment l'aspect trouble laiteux. Cependant on ne peut nier que l'expérience des frères Weber ne se trouve dans des conditions exceptionnelles et que dans l'océan, par suite des influences opposées qui se font sentir, voisinage du fond, variations du vent, courants, interférences diverses, la limite pratique ne soit atteinte notablement plus tôt.

Aimé a démontré expérimentalement la première loi, d'une manière très ingénieuse, en rade d'Alger, avec son entonnoir à huile disposé d'après le principe suivant.

Si réellement, dans l'ondulation de houle, le mouvement des molécules s'effectue sur place, sans translation horizontale, en supposant un observateur au fond de la mer tandis qu'un second observateur dans un bateau, est placé immédiatement au-dessus et laisse tomber verticalement dans l'eau agitée, un objet pesant, cet objet n'étant pas entraîné arrivera sensiblement aux pieds de l'observateur du fond. Il en sera de même et le même trajet vertical est accompli de haut en bas par un objet léger qui, déposé sur le fond, remontera vers la surface. Il suffira alors d'un seul observateur installé à la surface de l'eau. Aimé fabriqua un entonnoir en métal, en ferma la base et la fixa sur une planchette lestée ; il introduisit dans sa pointe dirigée verticalement, un bouchon muni d'un tube

effilé et ouvert, le remplit d'huile et après l'avoir amarré à une cordelette, il l'envoya sur le fond immédiatement au-dessous du point où il se tenait en embarcation. Il vit alors à travers l'eau transparente, l'huile s'échappant goutte à goutte, parvenir à la surface, chaque gouttelette accomplissant son oscillation en va-et-vient, dans le plan de la propagation de la houle.

Aimé imagina un autre appareil pour déterminer pratiquement jusqu'à quelle profondeur se faisait sentir le mouvement des vagues. Il consistait en une caisse en bois remplie de pierres pour la faire descendre sur le fond, dont la face supérieure était recouverte d'une feuille mince de plomb au-dessus de laquelle était suspendue une sorte de toupie ayant presque exactement la densité de l'eau afin d'obéir aux plus faibles mouvements de la masse liquide ambiante et dont le pourtour était garni d'une rangée de pointes fines. Si l'eau est agitée, la toupie oscille et ses pointes, frappant la lame de plomb, viennent y pratiquer de petits trous preuve certaine de l'existence du mouvement. Il suffira pour posséder tous les éléments du problème, de connaître la hauteur des vagues, la profondeur à laquelle la caisse a été descendue et enfin de constater la présence ou l'absence de piqûres sur la lame de plomb. C'est ainsi qu'Aimé démontra, en rade d'Alger, que l'agitation de vagues de 3 à 4 mètres de hauteur, se fait sentir par 40 mètres de fond, la profondeur pratique serait donc environ dix fois la hauteur de la vague. Ces expériences devraient être reprises dans d'autres localités, pour d'autres hauteurs de vagues et peut-être serait-il nécessaire de modifier l'instrument de manière à le rendre non pas plus délicat mais plus maniable.

L'amiral Paris qui, en collaboration avec son fils, le lieutenant de vaisseau Paris enlevé si prématurément à la marine et à la science, s'est beaucoup occupé des vagues, a inventé un appareil appelé trace-vagues qui, flottant sur l'eau, inscrit automatiquement le profil des ondulations passant auprès de lui. C'est une perche de 11 m. 50, en sapin, lestée à sa partie inférieure, qui mise à la mer et grâce à la rapide diminution de mouvement des molécules d'eau en profondeur, émerge en partie tout en se maintenant

verticale et sensiblement immobile. Un flotteur annulaire placé à sa partie supérieure et glissant librement le long de la perche, est relié par un fil à un crayon qui monte et descend avec le niveau de l'eau, c'est-à-dire avec chaque vague, et inscrit ses déplacements sur une bande de papier se déroulant sous l'action d'un mouvement d'horlogerie logé tout au haut de la perche.

L'appareil a été modifié en Angleterre par Froude qui a diminué la longueur embarrassante de la perche et a mieux assuré son immobilité en amarrant à sa partie inférieure une corde soutenant un large cadre carré en bois, couvert de toile à voile, maintenu horizontal et convenablement lesté qui fait fonction d'ancre. Au moyen de l'un ou de l'autre de ces instruments, on relève un graphique exact de la forme des ondulations superficielles de l'eau qui se sont succédé pendant un temps quelconque, à la condition que leur hauteur ne dépasse pas 2 mètres ou 2 m. 50.

Nous nous sommes occupés jusqu'à présent des lames de houle. Ce phénomène, type d'oscillation pendulaire, est le cas le plus simple et par conséquent celui qui se présente le plus rarement dans la nature. C'est le mouvement de la mer pendant les calmes plats, dans les régions tropicales où, le long des bateaux à voiles arrêtés dans leur marche, le passager retrouve le lendemain à la même place, si quelque requin ne l'a pas happé, le papier qu'il a froissé et jeté la veille par-dessus bord. Ce calme n'a jamais qu'une durée limitée ; il est exceptionnel et, après un temps plus ou moins long, le vent souffle de nouveau et la mer se recouvre de véritables vagues appelées vagues forcées parce que le vent les force à marcher en avant. Le mouvement d'une molécule d'eau est alors la combinaison d'un mouvement de houle, dont nous connaissons les lois, auquel se superpose un mouvement de progression. La trajectoire ne se ferme pas sur elle-même. En effet, tout corps flottant finit tôt ou tard par arriver à un rivage après être resté quelquefois pendant des mois le jouet des vents et des courants et avoir accompli d'immenses trajets dans l'océan. Les ponces éjectées par les volcans sus-marins et pour cette raison flottantes, abordent toujours sur une côte et n'ont aucun motif pour tomber au fond, ce qui prouve

que les ponces trouvées au fond en gros fragments non surchargés de serpules ou autres coquillages de surface qui auraient pu les alourdir, proviennent très probablement de volcans sous-marins. Telle est encore l'origine des bois flottés qui couvrent comme une véritable barricade les plages polaires, de Terre-Neuve au Spitzberg, à Jan Mayen, Bären Eiland, le nord de l'Asie et de l'Amérique, partout où viennent aboutir des courants et où rencontrent la terre les vents qui ont balayé la mer. Les branches écorcées polies par les intempéries ont acquis un éclat argentin et sont, par endroits, tellement enchevêtrées les unes dans les autres qu'elles deviennent un obstacle difficile à franchir.

Une autre complication est due aux interférences. Lorsque deux forces de puissance et de direction différentes agissent simultanément sur le même objet, elles lui communiquent un mouvement qui n'est ni celui que lui communiquerait la première force si elle agissait seule, ni celui que lui communiquerait la seconde si pareillement elle était seule en action, mais une résultante qui participe de l'une et de l'autre. Les deux mouvements primitifs ont interféré entre eux. L'interférence peut même être nulle comme dans le cas de l'immobilité d'une personne choquée en même temps par deux autres personnes également fortes et poussant en sens diamétralement opposé. Les ondulations manifestent des interférences qui, selon les circonstances, augmentent ou diminuent leur hauteur. Si le long d'un quai, une vague revenant sur elle-même après avoir frappé la muraille, rencontre crête à crête la vague qui la suivait au large mais qui n'a pas encore touché la terre, il y a choc, l'eau est arrêtée dans sa progression dans un sens et dans l'autre et comme il faut que la force vive se dépense, elle s'élève verticalement à une hauteur prodigieuse. Le phare d'Eddystone, sur la côte d'Angleterre est, par mauvais temps enveloppé de colonnes d'eau qui se dressent jusqu'à 30 mètres de hauteur. Le même effet se produit contre les grands icebergs tabulaires antarctiques aux parois abruptes. La mer démontée si dangereuse du centre des cyclones est provoquée par la rencontre et les interférences de vagues sensiblement égales et venant à la

fois de toutes les directions. Le bâtiment, dans cette terrible position, monte et descend sur les flots qui le secouent par saccades et le disloquent. On citerait une foule d'exemples où les interférences se font sentir et doivent être prises en très sérieuse considération car elles sont susceptibles de provoquer de graves dangers. Tantôt c'est l'entrée d'une rade rendue difficile par des réflexions et des interférences contre des rivages d'orientations différentes, tantôt c'est la rencontre d'un courant. Le mascaret est une interférence entre l'eau d'un fleuve s'écoulant vers la mer et l'onde de marée qui, en sens diamétralement opposé, monte de la mer vers la source du fleuve. Lorsque la puissance de la marée l'emporte sur celle du courant, il se fait une énorme volute suivie parfois de deux ou trois autres, s'avançant d'aval en amont et qui culbute les embarcations et même les navires mouillés dans le fleuve et qui n'ont pas pris de précautions suffisantes. Tel est le « bore » du Gange et des grands fleuves de Chine où il est particulièrement à craindre parce que le volume d'eau des fleuves et la puissance de la marée, les forces antagonistes, sont toutes considérables. Le mascaret de la Seine devant Caudebec est un diminutif conforme à la faible importance relative de la Seine et des marées de la Manche.

Les frères Weber ont disposé un appareil d'une extrême simplicité permettant d'élucider expérimentalement les phénomènes d'interférences dans tel ou tel cas particulier susceptible d'être reproduit artificiellement. Il consiste en une cuvette ou auge en verre, pleine de mercure dans laquelle, en divers points, on fait tomber à des intervalles de temps déterminés, de hauteurs variables, des gouttelettes de mercure, grosses ou petites. On place dans la cuvette, s'il est nécessaire, des bandes de tôle repliées sur elles-mêmes et dépassant le niveau du mercure, de manière à figurer un goulet, une entrée de port, un contour géographique quelconque. Il se produit des systèmes d'ondes avec interférences, visibles à cause du brillant du mercure et que les frères Weber ont copiés. Maintenant qu'on possède la photographie, on obtiendrait sans doute de très précieux résultats, peut-être insoup-

çonnés, en prenant des instantanés ou encore en se servant du cinématographe.

Les interférences expliquent aussi le renforcement, dans une série de vagues, de celle qui y occupe un rang déterminé. Il n'est personne, qui, assis sur une plage, n'ait observé le phénomène. Tantôt la plus forte vague est la troisième, d'autres fois la quatrième ou la cinquième, d'autres fois la septième, la huitième, la dixième. Les combinaisons sont très diverses car elles dépendent d'une infinité de variables, la direction, le nombre, la force respective des vagues interférant, la profondeur de la mer, la pente du fond, la forme du rivage. Les marins en pleine mer savent merveilleusement reconnaître d'un simple coup d'œil les interférences et les réduire en leurs éléments de façon à évaluer la direction et la force de chacun des systèmes de vagues qui agitent la mer autour d'eux et souvent, par ce moyen, ils préjugent du temps qu'il a fait et de celui qu'ils ont chance de rencontrer dans les parages vers lesquels ils se dirigent.

Les mouvements d'ondulations ne sont pas dus uniquement au vent ; ils peuvent être provoqués par des secousses de tremblements de terre. L'ondulation se présente alors sous la forme d'une énorme vague ayant 10, 20 et jusqu'à 27 mètres de hauteur qui se propage à travers l'océan en exerçant une sorte d'aspiration sur l'eau située en avant et peut-être trouverait-on dans ce phénomène la preuve d'un effrondrement brusque du lit marin formant une cavité où s'engouffrent subitement les eaux. Lorsqu'elle s'approche du rivage opposé à celui où elle a pris naissance, l'aspiration la précède et la mer se retire, mais après un temps variable, la crête de la vague apparaît, se précipite en avant, recouvre l'espace antérieurement abandonné puis, continuant sa route, elle pénètre dans les terres, balayant tout sur son passage, engloutissant les malheureux habitants comme pendant le tremblement de terre de Lisbonne où 30 000 personnes périrent. Le phénomène porte le nom de raz-de-marée. Pendant le tremblement de terre de Lisbonne, en 1690, la mer recula de 15 kilomètres pour ne revenir que trois heures après. Le retour de l'eau s'est une fois fait attendre pen-

dant vingt-quatre heures. Si de tels cataclysmes sont terribles contre une côte élevée, on conçoît qu'ils le soient plus encore sur une côte plate. Ils le sont surtout pour les îles de corail qui émergent à peine de quelques mètres au-dessus du niveau de l'eau et sur lesquelles passent les vagues de tremblements de terre ou de cyclones, fauchant tout devant elles : maisons, plantations et habitants. La vitesse des vagues de tremblements de terre est très grande. L'ondulation du tremblement de terre de Simoda au Japon, le 23 décembre 1854, a mis douze heures cinq minutes à se rendre à San Francisco et à San Diégo, en Californie, ce qui représente une vitesse de 660 kilomètres à l'heure. Elle avait une hauteur de 50 centimètres seulement, une longueur de 390 kilomètres ou 210 milles et offrait l'apparence de deux vagues se suivant à un intervalle de trente-cinq minutes. Si la profondeur de l'océan est uniforme, il en est de même de la vitesse de la vague, ces deux éléments sont reliés l'un à l'autre par une relation simple ; connaissant l'un, ce qui est facile, le moment exact d'arrivée étant enregistré par les marégraphes, on peut calculer l'autre et c'est ainsi que bien avant que des sondages directs ne fussent faits, on avait estimé la profondeur moyenne de l'océan Pacifique.

Le voisinage du fond diminue la vitesse des lames qui est proportionnelle à la racine carrée de la profondeur ; il diminue leur longueur qui est proportionnelle à la profondeur mais il ne modifie pas la période. En revanche, il augmente la hauteur. C'est pour ce motif que souvent les vagues sont plus hautes près de terre qu'au large. Longues dans les mers étendues, elles sont courtes et saccadées dans les petites. On est plus malade sur la Méditerranée, la Manche et la mer du Nord que sur l'Atlantique. La vague rencontrant une diminution brusque du fond se dresse à une hauteur considérable, retombe et se brise sous son propre poids. Quand la profondeur rencontrée par une vague devient très faible, comme en arrivant sur une plage, les molécules frottant contre le sol sont retardées dans leur mouvement, celles de la surface le sont beaucoup moins, il en résulte que la section transversale de

la vague change sa forme symétrique de crête ou de creux ; les particules superficielles courent plus vite que les particules profondes, la crête elle-même perd sa symétrie, la portion la plus élevée se recourbe sur elle-même en avant, dépasse la position d'équilibre, tombe, s'écrase en écume puis l'eau redescend en nappe vers la mer et l'on a le phénomène du ressac si admirable sur certaines plages, après de gros temps, alors que chaque lame en haute volute laisse apparaître sa concavité glauque, sombre et limpide frangée d'écume et roule avec fracas sur les galets.

Le frottement contre le fond, producteur d'un retard dans la vitesse de la vague, fournit l'explication d'un phénomène assez étonnant au premier abord et cependant facile à comprendre. De quelque côté que vienne le vent et par conséquent les vagues, elles semblent toujours déferler à peu près parallèlement à la plage. Qu'on les suppose arrivant suivant une direction oblique ; en s'approchant de terre, chacune d'elles trouvant d'un côté une eau moins profonde, éprouve un retard tandis que l'autre portion de la même lame, encore en eau relativement plus profonde puisqu'elle est plus éloignée de terre, conserve sa vitesse. Il en résulte une conversion et chaque vague finit par arriver sur la plage sensiblement de front. Il n'en est cependant pas rigoureusement ainsi ; il se manifeste toujours un peu d'obliquité et la force se sépare en deux composantes : l'une perpendiculaire à la terre qui s'anéantit promptement, l'autre parallèle qui donne naissance à un courant côtier suivant le rivage où il exerce une influence importante sur le transport des sédiments sableux. Si en se tenant tout au bord du sable, en marée montante, on lance à la mer un morceau de bois, on remarque qu'il n'attérit jamais qu'un peu à droite ou à gauche, de sorte que pour le ramasser de nouveau, on est obligé de se déplacer. La direction la plus commune suivie par les vagues c'est-à-dire celle des vents dominants dans la région, mérite d'être prise en sérieuse considération en particulier par les ingénieurs chargés de travaux à la mer.

La Kaléma ou barre des côtes d'Afrique, les rollers de Saint-Paul de l'Ascension, de Sainte-Hélène, tiennent à des causes analogues.

Il en est de même, sur une échelle moindre, partout où des plages rectilignes très étendues, en pente douce, sont suivies par un abaissement brusque du fond en face d'une mer assez vaste pour que les vagues y soient susceptibles d'acquérir une grande puissance, sur la côte des Landes en France, sur celles des États-Unis bordant l'Atlantique, celle de Coromandel près de Madras, à Sumatra, au Pérou et ailleurs. La Kaléma ou barre de Guinée est particulièrement connue. Elle consiste, selon la région, en un, deux ou trois rouleaux qui se maintiennent d'une façon en quelque sorte permanente entre la terre et le large. Leur force varie d'après une foule de circonstances, mais plus petits ou plus grands, les brisants comme on les appelle, existent toujours. Pour les franchir, il faut des embarcations spéciales et des piroguiers exercés et ils sont un grave obstacle au commerce car ils obligent soit à construire un wharf jusqu'en eau profonde, soit aux frais considérables d'un débarquement difficile et dangereux aussi bien pour les voyageurs que pour les marchandises. On rattache encore aux mêmes causes, peut-être compliquées d'actions volcaniques, les phénomènes des vagues de fond qui sont isolées ou celles par séries, se brisant plus ou moins inopinément sur les plages et désignées par les noms de marrobio sur les côtes occidentales et méridionales de Sicile, de las tascas près d'Alicante et de Valence sur la côte d'Espagne, et de resaca dans les ports basques, particulièrement à Pasajes.

Beaucoup d'autres particularités des vagues ont donné lieu à des études.

Le clapotis est un phénomène d'interférences de vagues. Il provient aussi de la rencontre de deux courants marchant en sens inverse, ou encore de vagues forcées par le vent dans une certaine direction et heurtant un courant violent.

On aurait tort de penser que la grosseur des lames augmente indéfiniment avec la force du vent. Arrivée à une certaine hauteur ; la mer cesse de grossir ; quelle que soit la violence du vent, les lames deviennent toutes égales car elles se protègent mutuellement contre la tempête dont l'action moindre dans les creux s'exerce

avec son entière fureur à partir du plan passant par l'ensemble des crêtes. Si l'une d'elles le dépasse, elle est immédiatement arasée et l'eau réduite en poussière impalpable.

La grêle et la pluie abattent la mer. Les gouttes tombant à peu près verticalement arrêtent jusqu'à une profondeur notable le mouvement des molécules aussi bien trochoïdal que de progression horizontale, s'il s'agit de vagues forcées. J'ai fait des expériences synthétiques en laissant tomber des gouttes d'eau fortement colorées dans un récipient rempli d'une épaisseur d'eau variable et au fond duquel est étalée une mince couche de sable fin. On commence par faire tomber les gouttes d'une petite hauteur qu'on augmente progressivement jusqu'à ce qu'on observe un déplacement du sable. On mesure alors la hauteur de chute et celle de l'eau dans le récipient. On remarque aussi, grâce à la coloration, que chaque goutte descend au sein du liquide sous forme d'un tore roulant sur lui-même et se subdivisant après un parcours limité. L'expérience est très intéressante.

Tout ce qui diminue l'adhérence de l'eau avec l'air sus-jacent contribue à calmer la mer. La mer est moins grosse par temps brumeux que par temps sec parce que l'air humide est moins adhérent que l'air sec. Quiconque a navigué sur les bancs de Terre-Neuve par temps de brume a été frappé de l'aspect lourd, amolli, lisse des flots chargés du pesant manteau de brouillard si fréquent dans ces parages. Mais le phénomène le plus remarquable est l'apaisement subit de la mer sur laquelle on répand de l'huile. Comme beaucoup d'autres découvertes sur lesquelles s'est inopinément fixé l'engouement du public, cette action est connue depuis des siècles; Plutarque et Pline en font mention et, sans parler des auteurs du moyen âge, Canisius, Erasme, Linné, Franklin l'a étudié en 1772. L'effet est très net. L'huile détruit l'adhérence de l'air avec l'eau, il glisse à sa surface, impuissant à y creuser les petites dépressions, vaguelettes élémentaires qui donneraient ensuite prise aux bouffées de vent et finiraient par devenir de vraies vagues. On observera un résultat analogue lorsque, pour une cause quelconque, la surface de l'eau se couvrira d'obstacles à la prise

du vent, de particules de boue. par exemple, d'herbes flottantes et aussi, ce qui est le cas pour l'eisbrei des mers polaires, quand de petits cristaux de glace apparaîtront tout d'un coup sous l'action du froid et communiqueront à l'eau la consistance à demi-pâteuse d'un sorbet. La mer s'apaise dès que le phénomène apparaît. L'atténuation des rides superficielles permet d'apercevoir le fond à une distance assez considérable lorsqu'on y jette quelques gouttes d'huile qui s'étalent en une pellicule excessivement mince. Le procédé est bien connu des pêcheurs de corail ou d'éponges et remplace quelquefois pour eux l'emploi de la lunette d'eau.

L'ingénieur anglais Thomas Stevenson a cherché à mesurer la pression exercée par les vagues sur un obstacle qui leur est opposé. Dans ce but, il a fait creuser dans une roche recevant directement le choc de la mer une cavité dans laquelle était installé un dynamomètre constitué par une forte plaque de fonte verticale maintenue en arrière par un puissant ressort et qui, en reculant lorsqu'elle était poussée par l'eau, comprimait plus ou moins le ressort. Un index de cuir courant à frottement doux sur une tige perpendiculaire permettait d'évaluer le recul de la plaque et comme le ressort avait été préalablement étalonné, il était facile d'estimer la pression. Celle-ci est énorme : elle a varié sur les côtes d'Angleterre où ont été faits les essais, entre 14,7 et 34,2 tonnes de mille kilogrammes par mètre carré de surface. Les effets produits par la mer sont véritablement effrayants. On a vu un bloc de gneiss déplacé horizontalement de 22 mètres ; d'autres pesant de 6 à 13 tonnes ont été portés à un niveau supérieur de 20 mètres à celui qu'ils occudaient. A Wick, sur la mer du Nord, un bloc de 1 350 tonnes a été jeté à une distance de 10 à 15 mètres.

Aux phénomènes des vagues ou plutôt des ondulations d'une masse liquide, se rattache un phénomène qui a vivement excité la sagacité des chercheurs. Aussitôt que son existence a été reconnue on a pendant longtemps cherché à en expliquer les causes et, ainsi qu'il arrive presque toujours, après être parvenu à force de travaux et de mesures à en élucider les caractères et à en découvrir les lois en un petit nombre de localités, on l'a trouvé beaucoup plus

commun qu'on n'aurait pu le soupçonner au début. Il s'agit des seiches du lac Léman appelées Ruhss sur le lac de Constance.

Les seiches consistent en une ondulation rythmique de l'eau des lacs qui, en un même point, monte et descend en alternances régulières, sorte de marée microscopique signalée pour la première fois dans le lac de Genève en 1730 par Fatio de Duillier, étudiée en 1742 par Jallabert, plus tard par Bertrand, puis par de Saussure en 1779, par Vaucher de 1802 à 1804, qui en cherchèrent vainement l'explication, enfin par F. A. Forel en 1873 qui parvint à résoudre la question.

Quand on désire comprendre un phénomène naturel, il importe tout d'abord de le mesurer ; on en cherche ensuite les causes, on vérifie ce qui n'est encore qu'une hypothèse et on transforme celle-ci en une véritable explication scientifique en reproduisant synthétiquement le phénomène de manière à bien saisir les relations qui lient entre elles les diverses variables ou du moins les plus importantes parmi celles qui le constituent. Les seiches étant des variations de niveau de l'eau, c'est-à-dire de petites marées, seront mesurées à l'aide de marégraphes plus ou moins simplifiés et qui, étant installés sur des lacs, bassins limités où les seiches se manifestent avec leur maximum de netteté, se nomment des limnimètres. Cependant, pour parvenir au même résultat, Forel a imaginé un instrument aussi simple qu'ingénieux et précis dont le seul inconvénient est de ne pas enregistrer et d'exiger par conséquent, la présence continue d'un observateur.

Le plémyramètre consiste en un tube de verre droit et long d'une vingtaine de centimètres dans lequel on a introduit une petite boulette de cire lestée de quelques grains de sable, de manière à lui donner à peu près exactement la densité de l'eau. On empêche la boulette de sortir du tube en plaçant à chacune des extrémités de celui-ci, un tortillon de fil de fer en spirale ; on ajoute ensuite deux bouts de tube de caoutchouc, l'un long, l'autre court. Le tube de verre est disposé horizontalement sur le bord du lac où il s'agit d'expérimenter, au moyen d'un support quelconque ; le long tube en caoutchouc plonge dans les eaux du lac, le tube court dans un

baquet calé entre des pierres. Le tout est rempli d'eau et l'on établit ainsi l'égalité de hauteur entre le lac et le baquet. Le plémyramètre est alors prêt à fonctionner.

En effet, si l'eau du lac monte, par un phénomène de siphon, elle passe dans le baquet, à travers les tubes, et la boulette de cire qui suit ses plus faibles mouvements est entraînée et se colle contre la grille en fil de fer du côté du baquet. L'équilibre se maintiendra constamment entre le grand récipient, qui est le lac, et le petit. L'eau du lac vient-elle à s'abaisser, le même phénomène se produit en sens inverse et la boulette quittant la place qu'elle occupait, court se coller à l'autre extrémité du tube de verre. L'observateur n'a qu'à noter la durée de ses séjours soit d'un côté soit de l'autre et à s'en servir pour tracer sur un papier quadrillé une ligne brisée en créneaux d'inégales longueurs qui représente graphiquement le phénomène. L'appareil a permis à Forel d'établir les lois des seiches ; il sert maintenant à les vérifier. Ces lois sont les suivantes.

Petites ou grandes, régulières et parfois irrégulières, les seiches existent dans tous les lacs. On les a observées sur la mer. Aimé qui n'en connaissait pas l'existence sur les lacs de Suisse car il n'en fait aucune mention, en a découvert dans le port d'Alger. Depuis lui et surtout depuis les travaux de Forel, on en a reconnu à Malte, à Cette, Swansea, le Helder, à Port Moltke dans la Géorgie du Sud, en un mot partout où on a voulu en chercher.

Les seiches qui sont des ondulations, obéissent à toutes les lois des ondulations. Une nappe d'eau étant donnée, les seiches qui s'y manifestent sont longitudinales ou transversales et chacune de ces deux catégories se subdivise en trois systèmes différents, seiches uninodales avec un nœud et deux ventres, seiches binodales avec deux nœuds et trois ventres et seiches mixtes résultant de la superposition des deux premiers systèmes.

En résumé l'eau d'un lac est comparable à la corde tendue sur deux chevalets fixes et qui, vibrant par l'excitation d'un archet, présente séparés en parties aliquotes de sa longueur, des points immobiles ou nœuds intercalés à des distances égales entre des points de vibration maximum ou ventres. Suivant le point attaqué

par l'archet, la corde montre un, deux ou plusieurs nœuds avec le nombre correspondant de ventres. Comme une corde sonore, le lac modifiera sa subdivision harmonique selon l'endroit situé entre les deux points fixes où en sera intercalé un troisième faisant l'office du chevalet mobile d'un instrument à cordes. Ce rôle, dans un lac, sera joué par un haut-fond et de même qu'un chevalet bien ou mal placé permet à la corde de chanter juste ou de chanter faux, certains lacs produiront aussi des battements. N'est-on pas ramené ainsi aux idées de Pythagore, alors rêveries, aujourd'hui réalités, sur l'harmonie des phénomènes naturels, sur le rythme éternel et rigoureux du monde et des mondes ?

Les causes provoquant les seiches, l'archet faisant vibrer la masse d'eau, sont diverses : perturbations atmosphériques, variations de pression barométrique, vents verticaux et obliques, orages, cyclones, trombes, secousses de tremblements de terre. La plus fréquente est encore un orage local à mouvement vertical descendant.

Toutes les lois des ondulations se vérifient sur les seiches. Leur amplitude, sur un même lac varie selon les stations. Sur le Léman, c'est à Genève, située à l'une des extrémités qu'elles se font le mieux sentir. La plus forte dont on ait gardé le souvenir est celle du 30 octobre 1841 où, dans cette ville, le niveau de l'eau s'est élevé à 1 m. 83. Depuis cette époque, on en a jamais observé dépassant 40 centimètres. Les seiches sont fréquentes ; à peine sur le Léman, dans le cours entier de l'année, trouve-t-on quelques heures de suite, jamais une journée complète, où le niveau du lac ne manifeste aucune trace de ces phénomènes.

La théorie des seiches a fourni l'explication d'un phénomène connu depuis l'antiquité et dont les philosophes — et il n'y a pas lieu de s'en étonner car ils parlaient au lieu d'expérimenter et de mesurer — n'avaient jamais été capables de découvrir l'explication. Il s'agit du problème de l'Euripe, détroit qui sépare l'île d'Eubée du continent grec et dans lequel se précipita, dit-on, Aristote désespéré de son impuissance à trouver la solution.

L'Euripe ou Evripo est allongé du nord-ouest au sud-est, nota-

blement élargi dans la partie septentrionale où il forme un véritable lac, le canal de Talanti, communiquant par une étroite ouverture avec la mer, il se resserre ensuite jusqu'à n'avoir plus que 65 mètres de large devant Chalcis. Or des moulins à eau établis dans cette ville permettent de constater que le courant change alternativement, à intervalles réglés ou irréguliers, tantôt du canal de Talanti vers celui d'Evripo, à l'autre extrémité, tantôt inversement, de telle sorte que les moulins sont toujours en mouvement sur ce bras de mer comme ils le seraient sur un fleuve avec cette seule différence que sur un fleuve ils tourneraient continuellement dans le même sens, tandis qu'à Chalcis, ils tournent alternativement dans l'un et dans l'autre sens. Forel, en invoquant la théorie des seiches et en appliquant ses formules, a montré que le phénomène était attribuable partie aux faibles marées de la mer Egée et partie à des seiches du canal de Talanti, dont les mouvements, tantôt d'accord et tantôt en désaccord, règlent ou dérèglent les intervalles de temps séparant les changements de direction du courant et de l'écoulement de l'eau dans chaque sens.

On donne le nom de marées aux mouvements alternatifs de montée et de descente des eaux océaniques qui se manifestent en réalité sur toutes les mers mais sont particulièrement apparents sur les bords des océans étendus ou des mers en facile communication avec ceux-ci. Ce mouvement de montée et de descente se produit, dans le cas le plus fréquent, à intervalles réguliers de douze heures vingt-cinq minutes environ, c'est-à-dire un peu moins de deux fois par journée de vingt-quatre heures. Quand l'eau monte, il y a flux ou flot et, quand elle descend, reflux, èbe ou jusant. La mer après avoir atteint son maximum de hauteur, s'arrête ; elle est pleine et l'on est à l'étale de haute mer. Puis elle commence à descendre et lorsqu'elle est à son minimum, avant de reprendre son mouvement d'ascension, elle est à son étale de basse mer. Les deux moitiés du phénomène ne sont pas d'une durée rigoureusement égale : l'eau met un peu plus de temps pour descendre que pour monter. La différence entre la durée du jusant et celle du

flot, variable selon la localité, est de quinze minutes à Brest et de deux heures environ au Havre.

La grandeur ou amplitude d'une marée est l'élévation de la pleine mer au-dessus de la basse mer précédente. Les marées, en un même lieu, éprouvent en général, des variations de hauteur considérables. On a adopté pour zéro des cartes marines côtières le niveau minimum atteint par l'eau. Chaque mois, à l'époque de la nouvelle lune et de la pleine lune, en syzygies, les marées sont plus fortes et l'on est en vive eau; au contraire, elles sont faibles aux quadratures, c'est-à-dire au moment du premier et du troisième quartier de la lune, quand cet astre et le soleil passent au méridien à six heures d'intervalle, on est alors en morte eau. L'établissement d'un port est l'heure temps vrai locale de la pleine mer dans ce port le jour d'une syzygie équinoxiale, la lune et le soleil étant supposés sur l'équateur et à leurs moyennes distances de la terre.

L'étude des marées touche à l'océanographie et bien davantage encore à l'astronomie. Le phénomène océanographique consiste en une ondulation semidiurne, énorme lame de houle soumise à toutes les lois déjà connues des ondulations et, subsidiairement, dans les courants qu'elle suscite. Mais s'il s'agit d'expliquer la cause même de cette ondulation et, en vue des avantages qu'en retire la navigation, d'en prédire assez longtemps à l'avance les éléments caractéristiques, on entre complètement dans le domaine de l'astronomie.

Tel est du reste le motif qui permit aux anciens, particulièrement avancés dans les sciences astronomiques, d'acquérir les notions relativement précises qu'ils possédèrent sur les marées. L'absence presque complète de ce phénomène en Méditerranée les porta à en noter la présence partout où ils la constatèrent. Hérodote, au IVe siècle avant J.-C., parlait déjà des marées régulières du golfe Persique. Ils remarquèrent aisément leurs différences d'amplitude. Au IVe siècle avant J.-C., Scylax de Caryande, dans son Périple, citait comme particulièrement hautes celles des rivages situés au delà des Colonnes d'Hercule et Pythéas, étonné de leur hauteur

considérable dans les estuaires de la Grande-Bretagne qu'il venait de découvrir, signalait leurs relations avec les phases de la lune. Une centaine d'années environ avant le commencement de l'ère chrétienne, Posidonius se rendait en Espagne dans le seul but d'y mesurer des marées et, grâce à Strabon, nous savons qu'il avait été amené à admettre que le mouvement de l'océan comme le cours des astres était soumis à une marche périodique et qu'il présentait comme la lune, et harmoniquement avec elle, une période diurne, une période mensuelle et une période annuelle. Il avait en outre reconnu que les marées les plus fortes coïncidaient avec les syzygies et les plus faibles avec les quadratures.

Pendant le moyen âge, les connaissances scientifiques sur les marées comme sur tout le reste, reculèrent au lieu d'avancer. Aucune absurdité ne fut jugée indigne d'avoir ses causes expliquées. En revanche on ne prit pas une seule mesure, on se contenta de raisonner. Le géographe arabe Maçoudi attribuait le flux et le reflux à ce qu'un ange, du côté de la Chine, plongeait dans la mer et en retirait alternativement son talon ou peut-être seulement le pouce de son pied droit, ce qui suffisait pour faire monter et descendre le niveau des eaux. Un autre géographe arabe, Qazwini, mort en 1283, attribuait les marées à la chaleur du soleil et de la lune échauffant les eaux d'autant plus fortement en un lieu donné que ces astres se trouvaient au zénith de ce lieu et aux déplacements par raréfaction et par expansion qui en résultaient. Les Islandais croyaient à une émission plus ou moins grande d'humidité, de la part de la lune qui, aux syzygies, empêchait le soleil de sécher la mer et provoquait ainsi de fortes marées. Des opinions analogues sont encore aujourd'hui professées par les Chinois qui pensent que, l'eau étant le sang de la terre, les marées sont les battements de son pouls à moins qu'elles ne soient la manifestation et la preuve de sa respiration.

Au XVIe siècle, on recommença à étudier les marées d'une manière sérieuse. En 1553, Cabot, dans les instructions qu'il donnait en vue d'expéditions polaires, recommandait de noter, en chaque localité où l'on ferait un séjour, l'instant précis d'une cer-

taine marée déterminée. On recueillit ainsi de nombreuses mesures sur lesquelles s'appuyèrent Galilée pour attribuer le phénomène à la rotation de la terre, et Bacon pour l'expliquer par la configuration géographique des continents. Cependant Simon Stévin parvenait à prédire le moment de leur apparition en se servant des phases de la lune. Vers la même époque, Képler les faisait avec raison dépendre de l'attraction exercée par l'ensemble de tous les corps célestes, et, un peu plus tard, Descartes dont les opinions étaient d'ailleurs soutenues par l'éminent géographe Varénius, y voyait un effet de ces tourbillons qui lui servaient à expliquer tant de choses. En définitive, la véritable explication n'était trouvée que par Newton, le jour où il formulait les lois de la gravitation universelle. Après lui, le problème, mis au concours par l'Académie des Sciences, était traité au point de vue mathématique pur par Mac Laurin, Euler et Bernouilli en 1738 et enfin par Laplace en 1774. Cependant de patients observateurs s'occupaient à dresser à l'avance des tables de prévision de marées en cherchant à rattacher leurs résultats empiriques aux données astronomiques. De nos jours, parmi le nombre immense des travaux exécutés sur ce sujet, il suffira de citer Aimé qui, à Alger, à l'aide d'observations continuées pendant deux années, de 1838 à 1840, put affirmer l'existence de marées en Méditerranée, fixer leurs éléments et établir l'effet exercé sur elles par la pression barométrique, le vent et probablement les pluies. Marsigli avait bien tenté cette recherche, plus d'un siècle auparavant en Provence, mais perdu dans la complexité des résultats obtenus, il s'était trouvé incapable d'en tirer les conséquences.

Les observations de marées se font avec des marégraphes, instruments destinés à enregistrer automatiquement et d'une façon continue, les variations de niveau de l'océan. Un puits creusé au voisinage de la mer est en communication avec elle par un conduit ou par un tuyau assez étroit pour que les petites oscillations dues aux vagues soient éteintes mais néanmoins suffisamment large pour permettre au niveau de s'établir rapidement entre l'extérieur et l'intérieur du puits. Dans ce dernier se trouve un flotteur qui monte

LE FOND DE LA BAIE RED, SPITZBERG

(Cliché provenant des Collections de S. A. S. le Prince de Monaco.)

et descend avec l'eau et qui est relié, par une suite d'organes chargés de diminuer dans une proportion connue l'amplitude des mouvements, à un crayon installé devant une feuille de papier enroulée sur un cylindre mû par un mouvement d'horlogerie et faisant un tour complet en vingt-quatre heures. Ce crayon trace une courbe ayant pour abscisses les temps et pour ordonnées les hauteurs qui est l'image fidèle, quoique réduite, des variations du niveau de la mer. L'instrument type a été modifié de cent façons dans le but de le rendre plus précis. On l'installe sur le rivage, en un lieu abrité du mauvais temps, aussi près que possible de la mer profonde. On évitera de le placer au voisinage de l'embouchure de fleuves, car un apport abondant d'eau douce amène dans la densité de l'eau de mer des variations susceptibles de modifier dans de certaines limites le niveau marin au voisinage immédiat de la côte.

L'explication complète des marées est la conséquence de deux lois : celle de la gravitation — les corps s'attirent en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré de la distance les séparant — et celle des interférences des ondes. A ce titre, la théorie des marées devient une véritable théorie musicale.

Supposons la lune tournant autour la Terre immobile, dans le plan de l'équateur terrestre, en vingt-quatre heures et cinquante minutes. La Terre avec son enveloppe d'eau attire la lune et est attirée par elle, les attractions se faisant proportionnellement aux masses respectives de la Terre qui est très grosse et de la lune qui est très petite. En outre l'attraction ayant lieu en raison inverse du carré de la distance, l'eau mobile sera fortement attirée du côté de la lune, dont elle est relativement proche ; la Terre considérée comme condensée en son centre, le sera moins parce qu'elle est plus éloignée, enfin l'eau mobile du côté diamétralement opposé à la lune, le sera extrêmement peu parce qu'elle est encore plus loin. Il en résultera que, du côté de la lune, la masse océanique se gonflera, et que du côté diamétralement opposé, le sol sous-marin invariablement lié au centre du globe qui l'entraîne par suite de la rigidité de la masse terrestre, sera encore un peu attiré tandis que la masse d'eau restera franchement en arrière et par conséquent accumulée

en protubérance. Au total, il se produira deux ondes océaniques situées à l'opposé l'une de l'autre, dans le plan du méridien terrestre passant par la lune, dont le maximum sera sur la droite joignant, dans ce plan, le centre de la Terre au centre de la lune et le minimum à l'un et à l'autre pôle où existera une dépression permanente. Or la lune faisant le tour de la Terre en vingt-quatre heures cinquante minutes, les deux vagues la suivront continuellement et, pendant ces vingt-quatre heures cinquante minutes, chaque lieu de l'équateur terrestre et du méridien correspondant subira le passage de deux ondes dont chacune sera par conséquent séparée de l'autre par un intervalle de douze heures vingt-cinq minutes. Il y aura donc, pendant cet intervalle de temps, pour chaque lieu, une pleine mer, un jusant, une basse mer et un flux, la même série se continuant indéfiniment.

G.-H. Darwin base l'explication qu'il donne des marées sur la force centrifuge développée par la rotation d'un système composé de la Terre et de la lune tournant autour d'un point situé sur la droite joignant les deux astres, centre de rotation et centre de gravité du système, fonction des masses si différentes de la Terre et de la lune et par conséquent beaucoup plus près de la Terre que de la lune. L'attraction ou force centripète produirait sur la Terre la vague de marée au point faisant face à la lune et la force centrifuge le gonflement de l'océan ou seconde vague de marée du côté diamétralement opposé. En revanche une dépression se manifesterait dans les deux sens, autour des deux pôles. La théorie de Darwin et celle de Laplace se complètent l'une l'autre.

Quelle que soit l'explication admise, la lune n'a pas seule une influence sur la Terre, le soleil exerce aussi son action et, par conséquent, provoque dans les eaux de l'océan sa double onde de marée, fonction de sa masse beaucoup plus considérable que celles de la lune et de la Terre et de sa distance beaucoup plus considérable, elle aussi, que celle qui sépare la lune de la Terre. Au total, la marée solaire plus faible que la marée lunaire, aura lieu non plus par périodes de douze heures vingt-cinq minutes, mais exactement de douze heures, puisque le soleil accomplit sa révolution autour du

globe en vingt-quatre heures. Il se produira une interférence des deux marées solaire et lunaire. Alors que la lune et le soleil seront tous deux exactement en ligne avec la terre, soit du même côté, soit dans des positions diamétralement opposées, c'est-à-dire aux époques des syzygies ou, en d'autres termes, de la pleine lune et de la nouvelle lune, l'interférence des deux ondes accumulera les intensités respectives en une intensité totale plus grande de sorte que l'onde résultante constatée sur la mer sera plus grande. Lorsque la lune et le soleil seront au contraire en quadratures, c'est-à-dire aux premier et troisième quartiers, leurs actions se contrarieront et la marée totale offrira son minimum d'intensité. On aura donc une inégalité mensuelle se traduisant par des marées de vive eau et des marées de morte eau.

Le soleil et la lune n'agissent pas seuls mais bien l'ensemble de tous les corps célestes. Leur influence est faible quoique suffisante pour donner de nouvelles marées, de nouvelles interférences et par suite des variations correspondantes dans l'intensité de la marée réelle.

Les causes de perturbation du phénomène, excessivement simple tant qu'il n'était question que de la lune, vont devenir de plus en plus nombreuses.

Tout d'abord il n'est pas vrai que la lune demeure toujours dans le plan de l'équateur terrestre, ainsi qu'on l'a supposé au début pour plus de simplicité. Elle se meut tantôt au nord et tantôt au sud, d'où résulte une variation dans la marche constatée de la marée. C'est l'inégalité diurne.

Il en est de même du soleil qui, pendant le cours d'une année, décrit son orbite non dans le plan de l'équateur terrestre, mais dans celui de l'écliptique qui lui est oblique, autre cause de variation donnant l'inégalité annuelle.

Ni la lune ni le soleil ne restent à la même distance de la Terre dont ils s'éloignent et se rapprochent alternativement. Chacune de leurs positions provoque une variation dans la puissance d'attraction exercée sur l'océan ; c'est l'inégalité parallactique.

L'eau, en conséquence de son inertie, n'obéit pas à l'attraction

au moment même où celle-ci se fait sentir, c'est-à-dire à l'instant précis du passage de l'astre. Elle éprouve un certain retard qui, combiné avec d'autres actions spéciales à chaque port, notamment la configuration géographique de la côte et la profondeur de la mer au voisinage, vont donner lieu à l'établissement de ce port qu'on ne peut que déterminer expérimentalement, c'est-à-dire empiriquement en chaque localité.

Ce n'est pas tout. La terre subit une nutation, balancement régulier autour de son axe de rotation passant par les pôles, une précession, un retard dû au frottement exercé par la masse d'eau sur le lit océanique ; la pression barométrique tantôt faible, tantôt forte, pèse sur l'eau d'un poids variable qui déprime plus au moins son niveau ; le vent agit parfois dans le sens de la marée dont il augmente l'intensité, parfois inversement et il la diminue ; un apport d'eau douce modifie la densité de l'eau, sa masse et par conséquent sa hauteur, d'où résulte l'obligation d'éloigner autant que possible les stations marégraphiques des estuaires de fleuves dont le régime en temps de sécheresse ou de crue apporterait un trouble dans l'économie de la marée. Il en sera de même de la pluie, de la neige et, dans les régions froides, de la formation des glaces ou de leur fonte. Enfin le fond de la mer, en se relevant près des côtes, exerce sur l'onde de marée l'effet qu'il produit sur toute ondulation — une diminution de vitesse pour les molécules liquides profondes et par conséquent une augmentation relative de vitesse pour les molécules superficielles. C'est pour ce motif que les marées sont beaucoup plus fortes sur les côtes qu'au milieu des océans. Autour des îles, les marées sont faibles ; aux îles Sandwich et à Taïti leur hauteur maximum est de 30 à 50 centimètres seulement ; à Sainte-Hélène elle est de 1 mètre à peine tandis que dans le canal de Bristol, elles montent de 10 à 16 mètres, au mont Saint-Michel de 12 à 15 mètres et dans la baie de Fundy, en Nouvelle-Ecosse, l'endroit du monde où elles sont les plus hautes, elles atteignent jusqu'à 21,3 m.

La hauteur réelle de l'eau, en un point de la côte, est la résultante de toutes ces actions, le résultat final de leur commune

interférence. Si chaque influence particulière prise isolément est aisée à connaître, leur somme dépasse la puissance de l'intelligence humaine. Lorsque toutes les circonstances, non par l'effet du hasard qui n'existe pas dans la nature où tout n'est que loi, mais par celui des éléments trop nombreux pour qu'il soit possible à l'homme d'en prévoir l'ensemble, sont dans le même sens et défavorables, on a ces marées effroyables, sortes de cataclysmes qui submergent des régions entières ou, comme il est arrivé dans les Pays-Bays, transforment les marais bataves en lac Flevo, en Zuyderzee et, s'il faut en croire les traditions, refoulent devant elles les populations qu'elles n'anéantissent pas et provoquent des invasions qui changent l'histoire politique des nations.

Toutes les masses d'eau, petites ou grandes, éprouvent des marées ; celles du lac Michigan sont de 7 centimètres à Chicago et de 3 centimètres à Milwaukee. La Méditerranée a de faibles marées aussi bien à cause de ses dimensions restreintes que par suite de sa grande profondeur sur la presque totalité de ses côtes. C'est pourquoi elles prennent une importance particulière à l'extrémité des golfes très allongés, comme à Venise, dans l'Adriatique et sur les plages basses des Syrtes en Tunisie où elles arrivent à 2 m. 1 d'amplitude. Les mêmes phénomènes se retrouvent pour la Méditerranée américaine, mer des Caraïbes et golfe du Mexique, à Vera-Cruz où elles ont au maximum 60 centimètres et pour la Méditerranée d'Australasie, mers de Chine, de Soulou, de Célèbes, de Banda, de Java, où elles ne dépassent guère 2 mètres. Les interférences dues à la combinaison de tant d'ondes diverses — en laissant de côté les influences irrégulières telles que la pression barométrique, le vent ou la densité de l'eau — vont produire des résultats en apparence très surprenants et pourtant très simples à comprendre. Dans certains parages comme dans le golfe du Mexique et le golfe du Tonkin, il ne se produit qu'une marée unique par jour. A Taïti, en un point de la mer de Java et à Courtown en Irlande, les marées ne semblent être réglées que par le soleil et, tous les jours, le flux a lieu à la même heure. En revanche, sur le fleuve Tay à Stirling, en Écosse, il y a par jour, trois

pleines mers, quatre à l'embouchure de l'Amazone. De même que les cordes vibrantes rendant une note déterminée, produisent des battements, l'océan éprouve de petites ondes ayant une période variant entre cinq et quatre-vingt-dix minutes et une hauteur comprise entre 5 et 150 centimètres. Nulle part mieux que dans le phénomène des marées, on ne voit combien toutes les forces de la nature, en addition algébrique de termes positifs et négatifs et chacune individuellement variable selon les circonstances, agissent simultanément pour créer un phénomène unique manifesté par les quelques pas en plus ou en moins, que fait sur le sable un baigneur pour aller se plonger dans la mer.

La connaissance anticipée du mouvement des marées est du plus grand intérêt pour la navigation car leur hauteur, à une date et à une heure quelconques, permettra ou interdira à un bâtiment d'entrer dans un port ou d'en sortir, de franchir une barre ou de remonter un fleuve. Il importait donc de dresser à l'avance pour tous les jours de l'année, le tableau des mouvements du niveau de l'eau en une localité déterminée. On y était approximativement parvenu d'une manière empirique dès le commencement du siècle dernier par la comparaison de ce que l'on appellerait volontiers l'état astronomique avec les renseignements recueillis pendant une période suffisamment prolongée par le marégraphe. Depuis cette époque, de perfectionnement en perfectionnement, grâce à l'appui mutuel que se sont prêté l'analyse mathématique et la mécanique, la prévision exacte des marées rendue de plus en plus nécessaire par suite du développement pris par la navigation, a réalisé d'immenses progrès.

Pour calculer mathématiquement les marées futures d'une localité particulière, on commence par ne considérer que l'action unique de la lune, ce qui n'offre aucune difficulté et permet une première approximation. Afin de tenir compte des perturbations apportées par les divers éléments qui ont été cités et dont l'ensemble constitue en quelque sorte une lune irrégulière, on assimile successivement chacun d'eux à un certain nombre de satellites imaginaires de marche différente, se mouvant dans des plans dif-

férents et exerçant en conséquence une action spéciale mais régulière sur l'océan. On calcule l'effet produit par chacun d'eux ; on en fait la somme algébrique qui servira de terme de correction à la première valeur trouvée et fournira le chiffre du phénomène réel indiquant ce que sera la marée à une date ultérieure quelconque. Une observation sur place exécutée en notant la différence entre l'heure prévue et l'heure constatée d'une phase déterminée de la marée, permettra de fixer la constante résumant l'ensemble des influences locales dont on tiendra compte une fois pour toutes afin que le résultat final des calculs concorde bien avec la réalité.

On a imaginé des instruments nécessairement assez délicats et compliqués dont les divers mouvements réglés, chacun isolément, d'après l'influence régulière calculée qu'il représente mécaniquement, mais agissant simultanément, obligent un crayon actionné par la résultante de tracer la courbe qui représente parfois une année à l'avance ce que donnera le marégraphe de la localité. Tel est, par exemple, l'appareil de sir William Thomson maintenant en usage dans l'Inde où il prédit la marée pour 37 ports de l'océan Indien. Il somme 24 marées élémentaires et, après un réglage spécial pour chaque port, en quatre heures, il trace tous les diagrammes pour une année à l'avance.

Le mathématicien anglais Whewell a dressé des cartes indiquant par des lignes dites cotidales les localités par lesquelles passe simultanément la crête d'une onde de marée. Ces cartes sont loin de posséder l'intérêt qu'on leur avait d'abord attribué ; trop de variable ont à être représentées. Si l'on pouvait prendre une photographie instantanée de l'onde de marée à l'état où elle se trouve sur le globe entier, ce qui constituerait une excellente carte par lignes cotidales, cette image ne serait vraie que pour le moment même où elle aurait été faite et jamais plus, dans l'avenir, elle ne se retrouverait exacte.

Il ne reste qu'un mot à dire des courants de marées. La marée étant une ondulation, doit se produire sans déplacement horizontal des molécules liquides. Elle est une lame de houle et non une vague forcée. Mais il n'en est ainsi que si la masse d'eau est

supposée infinie en profondeur et en étendue ou, pour rester dans les conditions pratiques, que si elle est très profonde et très vaste. Lorsque le fond se rapproche de la surface, ce qui est le cas au voisinage des côtes, la trajectoire de chaque molécule cesse d'être circulaire et devient de plus en plus elliptique. Il en résulte un déplacement horizontal de cette molécule coïncidant avec les moments où l'eau est au plus haut point et au plus bas point de sa course, c'est-à-dire quand elle passe à l'extrême crête et à l'extrême creux de l'ondulation, à l'étale de pleine mer et à l'étale de basse mer. Alors se manifestera un courant appelé de marée qui, par interférence des diverses ondes, se transforme en courant tournant d'intensité variable selon la façon dont s'accomplissent ces interférences.

Enfin la marée produit une autre espèce de courants. Lorsque la marée venant de l'océan pénètre dans une petite mer ou golfe à entrée étroite, celle-ci laisse passer moins d'eau qu'il n'en arrive et il se fait une dénivellation qui augmente prodigieusement la rapidité du courant franchissant le goulet de l'extérieur vers l'intérieur. Le contraire a lieu en marée basse. Tel est le cas pour les violents courants de l'entrée du Morbihan, pour n'en citer qu'un exemple.

CHAPITRE XII

LES COURANTS MARINS

De même qu'un être vivant contient dans la masse entière de sa chair un réseau de veines et d'artères situées les unes à fleur de peau, d'autres dans la profondeur des tissus, superposées, larges ou étroites, laissant couler le sang dans des directions tantôt parallèles, tantôt obliques, tantôt diamétralement opposées, de même depuis sa surface, dans son épaisseur et probablement jusqu'au fond de certains de ses abîmes, l'océan est lui aussi sillonné de fleuves d'eau coulant au milieu de l'eau même, superposés, juxtaposés ou divergents, de sens parallèles ou opposés, les uns faibles jusqu'à être presque insensibles, d'autres aussi rapides que les cours d'eau terrestres les plus violents. Rien ne ressemble plus à la circulation d'un être vivant que la circulation de l'océan. Tout possède une influence sur un courant marin, la température, la composition chimique du liquide, sa densité, la profondeur et la nature du sol inondé, la direction et la force des vents, les contours géographiques des continents, les marées, la rotation terrestre. Comment s'y reconnaître dans cette complication qu'augmenteront encore les phénomènes mécaniques du mouvement, les réactions suites des actions qui se sont fait sentir, car il est des courants de réaction, de compensation qui existent non par eux-mêmes, mais parce que d'autres existent et que l'équilibre doit toujours tendre à se rétablir. On étudie cet ensemble à l'aide d'une méthode qui, par une curieuse coïncidence, correspond à une méthode fréquemment employée dans les sciences biologiques. On commence par constater les phénomènes et par les mesurer directement

puis, lorsqu'il n'est plus possible d'agir autrement, on imite le naturaliste qui fait passer sous le microtome un animal mou, le débite en une quantité de tranches parallèles qu'il range méthodiquement les unes à la suite des autres et qu'il observe ensuite de manière à faire en quelque sorte de la géométrie dans l'espace avec de la géométrie plane. On profite de caractéristiques permettant d'individualiser un échantillon d'eau et de le reconnaître au milieu de la masse liquide et, grâce à elles, on débite l'océan par tranches parallèles sur chacune desquelles on reconnaît les individus, on les suit dans leur mouvement et là encore on se rend compte de l'espace par des séries de plans, on étudie la dynamique par la statique en des points et à des moments différents. Le sujet en apparence compliqué devient alors clair, le procédé de travail est trouvé et pour avoir la clé de la circulation et même l'utiliser pratiquement, il n'est plus besoin que du temps qui seul permet de recueillir les innombrables documents expérimentaux indispensables pour l'élaboration définitive. On trouve donc une nouvelle application de cette observation si souvent faite — ne plus considérer l'océan comme une masse unique, mais comme une collection de bassins juxtaposés ayant chacun leur vie indépendante et qu'il faut examiner un à un. Les lois générales ne résulteront plus que de la comparaison de régions connues séparément d'une manière complète. On ne saurait trop le répéter, pour les courants comme pour le reste, le temps des grandes explorations océanographiques est passé. Quiconque se propose le réel progrès de la science et non la satisfaction plus ou moins désintéressée d'une vaine gloriole, doit aujourd'hui se résoudre à étudier les espaces limités mais à les étudier complètement.

Afin de simplifier l'exposé du tableau d'ensemble de la circulation océanique, nous diviserons le sujet et nous nous occuperons successivement de la circulation superficielle et de la circulation profonde. Où finit la première et où commence la seconde ? Les limites, mêmes artificielles sont impossibles à établir et l'absolue rigueur de la mathématique serait ici hors de propos. Prenons les mots dans leur sens le plus ordinaire, compris de tous, avec le

vague qu'il n'est pas possible de leur enlever et convenons que la circulation superficielle sera celle qui affecte les hautes couches de l'océan, tandis que la circulation profonde est celle des couches profondes.

L'historique de l'étude de la circulation océanique se résume brièvement. La connaissance des courants marins date sinon du jour de la découverte de la navigation du moins du lendemain, alors que monté sur son radeau, près de la terre, le premier sauvage s'aperçut que sans voile ni rame, par mer tranquille, il changeait de place par rapport aux rochers de la côte ou qu'il ramassa sur le sable, pour en entretenir son feu, des troncs ou des branches d'arbres qu'il n'avait vus nulle part dans son île. L'existence des courants constatée, l'humanité s'efforça de profiter de son expérience, empiriquement comme toujours, puisqu'il ne lui était pas possible de les étudier, faute d'instruments de mesure. Dès qu'ils eurent été inventés, quelque imparfaits qu'ils fussent, on se mit au travail et chaque fois que les outils devinrent meilleurs, l'œuvre devint plus précise. La connaissance des courants superficiels fit d'immenses progrès depuis la fin du XVIIIe siècle. Maintenant on s'attaque à la circulation profonde pour laquelle les procédés de mesure sont établis et dont l'étude se développerait plus rapidement, si l'on ne manquait de renseignements expérimentaux qui, plus particulièrement dans ce cas, doivent être nombreux. On attend d'elle la solution de bien des problèmes et, au point de vue des applications pratiques, c'est certainement l'une des branches de l'océanographie appelée à rendre le plus de services.

A l'aurore de l'histoire, les divers peuples de ces thalassocraties qui se succédèrent sur les côtes orientales de la Méditerranée, après eux les Grecs et plus tard les Romains, exécutèrent leurs voyages de piraterie ou de commerce dans des régions à courants particulièrement caractérisés et violents, entre le Palus-Mœotis et l'Euxin, dans le Bosphore, aux Dardanelles, entre la Sicile et l'Italie, au détroit de Gibraltar. Il leur fut facile de remarquer la direction suivant laquelle coulaient les eaux. La mer se couvre alors de rides qui donnent à sa surface un aspect moiré, les débris

d'herbes flottantes s'y disposent en traînées, l'eau change parfois de couleur et, caractère le plus frappant de tous, même par vent favorable, sans voiles, la marche du bâtiment est retardée ou le travail des rameurs devient plus pénible. Je me souviens qu'un jour, passant devant les Casquets, dans la Manche, sur un excellent sloop, portant toute sa voiture, l'étrave fendant l'écume, je voyais avec surprise les îlots et le phare, au lieu de reculer, s'éloigner en avant comme si nous étions immobiles et qu'ils fuyaient devant nous. Autre signe pratique des courants, les traversées d'un même point à un même point sont plus rapides dans un sens que dans l'autre. Les anciens furent si frappés de ces phénomènes qu'ils firent de l'océan entourant la terre, par delà les Colonnes d'Hercule à l'occident et la Caspienne à l'orient, un fleuve c'est-à-dire une nappe d'eau courante. Plusieurs d'entre eux rédigèrent de véritables instructions nautiques, entre autres, Timosthène de Rhodes, amiral de la flotte égyptienne sous Ptolemée Philadelphe, auteur d'un ouvrage de ce genre, aujourd'hui perdu mais employé par Eratosthène et Hippale qui découvrit le régime des moussons dans l'océan Indien et enseigna le parti à en tirer. Tous ces marins durent nécessairement connaître pratiquement les courants. Aristote voulut les expliquer en attribuant leur production à des inégalités dans le relief du fond ce qui était absurde ; en quoi en effet une différence de niveau entre les fonds des deux mers en communication, était-elle capable d'intéresser l'équilibre des portions supérieures de l'eau remplissant leurs bassins et de produire un déversement ? Du reste, si la légende est vraie, l'auteur lui-même fut médiocrement satisfait de sa théorie car il se noya, dit-on, désespéré de son impuissance à comprendre le double jeu en sens inverse du courant de l'Euripe. Les philosophes, les littérateurs à commencer par le maître d'Alexandre et à finir par Buffon, inventeur lui aussi d'une théorie des courants marins un peu plus absurde encore que celle de son prédécesseur, furent rarement heureux dans leurs tentatives d'explications littéraires ou philosophiques des phénomènes naturels.

Jusqu'à l'époque de la découverte de l'Amérique, si les connais-

sances pratiques augmentèrent en conséquence des progrès de la navigation, les connaissances théoriques restèrent stationnaires. On avait bien vu échouer sur les côtes occidentales d'Europe et d'Afrique des débris de bois exotiques, peut-être même travaillés de main humaine et l'on avait compris qu'ils devaient venir de loin, du côté où le soleil se couche, de la mystérieuse île de Saint-Brandan ou d'Antilia. Tels étaient les propos que le pilote portugais Martin Vicente qui avait recueilli une de ces épaves en pleine mer à 450 lieues du cap Saint-Vincent, tenait à Christophe Colomb rencontré pendant une relâche à Porto-Santo près de Madère. Dans l'Atlantique, dans le nord comme dans le sud des colonnes d'Hercule, les Phéniciens et les Carthaginois Hannon et Himilcon, les Massaliotes Pythéas et Euthymène, avaient eu à lutter contre les courants ramifications de la branche nord-orientale du grand circuit atlantique. Les Northmen aux XIe, XIIe et XIIIe siècles, dans leurs incessantes traversées exécutées plus souvent à la rame qu'à la voile, entre la Scandinavie et l'Angleterre, l'Irlande, l'Islande et le Vinland qui était l'Amérique, apprirent par une dure expérience à les connaître. Ils leur servirent à nommer diverses localités de ce même Vinland, Straumsoë, l'île des courants, Straumsfjord, la baie des courants, Straumness, le cap des courants. A la fin du moyen âge, avant Colomb, Gênois, Vénitiens, Portugais, Espagnols, Dieppois, Basques, dans leurs voyages à Madère, aux Canaries, aux îles du Cap Vert, pendant les nombreuses tentatives faites à l'instigation du Prince Henri le Navigateur pour accomplir le périple de l'Afrique, eurent eux aussi à naviguer à travers des régions à courants. Encore aujourd'hui, on rencontre à l'archipel du Cap Vert, de petites barques de pêcheurs de corail, venues d'Italie par étapes, portées par le courant, poussées par l'alisé de nord-est et qui ne reviennent jamais en Europe parce qu'il leur serait impossible de remonter ce courant qui leur est maintenant contraire. Au XIIe et au XIIIe siècles, les Arabes qui commerçaient par mer avec la Chine, utilisaient les courants et les vents des moussons et ils en expliquaient le régime à Marco Polo.

L'épave trouvée par le pilote Martin Vicente fut un des arguments dont Christophe Colomb se servit pour démontrer la possibilité d'atteindre l'Asie par l'ouest. Dans chacun de ses voyages d'Espagne en Amérique, dans la mer des Antilles, du Mexique et jusqu'à l'embouchure de l'Amazone, il ne quitta guère les courants. Le 19 septembre 1492, en plein Atlantique, il effectua la première observation en notant la direction oblique de sa ligne de sonde mise à la mer par temps calme, chargée d'un poids assez lourd quoique ne touchant évidemment pas le fond. On ne saurait s'étonner du manque d'observations précises lorsqu'il n'existe encore aucun instrument pour les exécuter, ni boussole, ni loch, ni chronomètre, ni thermomètre, ni connaissances en astronomie nautique suffisantes pour déterminer exactement une position en haute mer. La précision des observations suivit pas à pas la découverte, puis le perfectionnement des instruments. La déviation de la ligne de sonde fut la première méthode employée. Plus tard, on prit, en guise de plomb de sonde, une simple marmite, moins lourde et de surface plus considérable, offrant par conséquent plus de prise au courant qui l'entraînait. Le procédé est décrit par Sir Humphrey Gilbert au XVIe siècle. On se servit ensuite de flotteurs libres, puis de mesureurs mécaniques dans le genre de ceux d'Arfvedson, d'Aimé et de Pillsbury, puis d'aréomètres et maintenant, pour les mesures relatives à la circulation profonde, on a recours à l'analyse chimique. L'humanité a fait du chemin. Cependant, quelque précieux que soient les instruments perfectionnés, les instruments grossiers rendent plus de services qu'on ne serait tenté de le croire ; ils forcent la sagacité de l'observateur. Avec un outil mauvais, si l'ouvrier est de bonne volonté, il n'en devient que plus habile. Renan attribuait sa parfaite connaissance du latin à ce qu'il avait eu le bonheur de l'apprendre dans des livres mal faits. L'observation des courants à la ligne de sonde et à la marmite facilita la découverte de l'Amérique et, après Colomb, celle de l'Amérique du Nord par Cabot en 1497, qui utilisa le courant du Labrador, celle de l'Amérique du Sud, de la Guyane et du Brésil, de la route de l'Inde en doublant le cap de Bonne-Espérance par Diaz et

Vasco de Gama qui profita du courant de Mozambique, de toute la côte occidentale d'Afrique par les Portugais.

Christophe Colomb avait observé que la mer, dans l'Atlantique nord, suivait le cours apparent des astres, d'est en ouest, à l'équateur. Il observa les faits et en tira les conséquences pratiques. D'autres en cherchèrent les causes. Léonard de Vinci admettait une circulation de l'équateur vers les pôles, due à la température qui dilatait les eaux tandis que le courant inverse, des pôles à l'équateur, résultait de l'équilibre tendant à s'établir. Le cycle était ainsi fermé. Lenz, Arago et Humboldt devaient, bien des années après, reprendre l'hypothèse sans la modifier essentiellement. Au XVIIe siècle, on accordait le rôle principal à l'évaporation et on invoquait la rotation de la terre pour expliquer le courant atlantique équatorial. En 1665, le P. Athanase Kircher traçait une carte générale des courants sur laquelle s'appuyait Vossius pour invoquer l'action d'un *motus proprius* des eaux qui, dans la zone torride, leur faisait suivre le cours du soleil quitte à attribuer les exceptions à cette marche, aux latitudes plus élevées, à un *motus tertius priori semper contrarius*, c'est-à-dire à un contre-courant. Le P. Fournier, plus prudent et en vrai praticien qu'il était, vingt ans avant Vossius, s'était borné, sans émettre la moindre théorie, à dresser la liste des vingt localités où des courants avaient été observés et à donner le résultat des mesures.

Marsigli ne pouvait pas se désintéresser des courants, bien qu'ayant eu le bon sens de ne guère s'occuper que de questions locales. Ce n'est pas un des moindres mérites de ce créateur de l'océanographie d'avoir compris que, réduit à ses seules forces, sans l'aide du Prince inconnu dont il souhaitait l'appui pour sa science de prédilection, il lui fallait se restreindre et procéder du particulier au général en étudiant complètement et à tous les points de vue, une région limitée. Dans ses explorations bornées à la côte de la Provence et à celle du Languedoc, il reconnut l'existence de courants continus et de courants interrompus, c'est-à-dire réguliers et irréguliers, de surface et profonds, différents les uns

des autres sur une même verticale et subissant l'influence du vent et du relief du fond. Il discerna le sens de la circulation en Méditerranée, mais il en constata l'extrême complication et en même temps ne se dissimula point son impuissance à résoudre seul un problème qu'il ne jugeait susceptible d'être résolu que par les observations simultanées de plusieurs observateurs. Son opinion était parfaitement exacte surtout devant Cassis où il opérait. La mer de Ligurie est un véritable détroit entre la Corse et le continent, une « Rivière » selon l'expression italienne, où passe le grand courant qui suit toutes les côtes du bassin de la Méditerranée, de l'ouest à l'est sur la côte méridionale et en sens inverse le long de la côte septentrionale. Nulle part les phénomènes de circulation ne sont plus compliqués que dans les détroits. Si l'on veut, comme il est sage, procéder du moins difficile au plus difficile, du simple au compliqué, en Méditerranée, c'est par le centre du tourbillon doué du summum de tranquillité qu'il faut débuter, c'est-à-dire entre les Baléares, la Corse et la Sardaigne. Or Marsigli n'en avait pas les moyens matériels.

On se rappelle les expériences de Franklin, à la fin du XVIIIe siècle, ses mesures de température entre l'Europe et l'Amérique du Nord, son examen du Gulf-Stream, sa théorie de la navigation thermométrique continuée par son neveu Jonathan Williams, puis par l'anglais Blagden et finalement abandonnée aujourd'hui comme toutes les théories trop exclusives qui ont le tort de tout expliquer par une cause unique alors qu'au contraire les forces de la nature s'unissent toutes quoique par parts inégales et variables dans la manifestation d'un phénomène. Franklin eut le mérite de donner au vent l'influence capitale dans la création des courants.

En 1836-39, l'ingénieur hydrographe français de Tessan embarqué sur la *Vénus* commandée par celui qui devint ensuite l'amiral Dupetit-Thouars, étudia la branche nord-ouest du courant qui, dans le Pacifique, est l'exacte contre-partie du Gulf-Stream dans l'Atlantique nord et qu'on appela longtemps courant de Tessan. Il porte maintenant le nom japonais de Kuro-Sivo, le courant bleu foncé, ce qui prouve une fois de plus, après Marsigli et

avant Aimé, que les océanographes ne moissonnent pas de lauriers sous pavillon français.

Aimé s'occupa peu des courants. Il voulut étudier le double courant superposé du détroit de Gibraltar; il fit même le voyage, mais des circonstances indépendantes de sa volonté l'empêchèrent de mettre son projet à exécution. Il se contenta de lancer des bouteilles flottantes sur la côte d'Algérie et de comparer leurs trajets à ceux d'épaves de navires naufragés. Il attribuait les courants au vent et n'ignorait pas que leur route était influencée par le relief du fond. Il admit l'existence de courants superficiels et profonds et, dans le but de mesurer ces derniers, imagina un compteur-indicateur ingénieux comme tout ce qu'il inventa et qui, par cette mauvaise chance qui ne cessa de le frapper pendant sa courte existence, servit non à son auteur mais à un étranger, l'amiral danois Irminger, pour prendre de nombreuses mesures dans l'Atlantique nord.

Il reste peu à dire maintenant pour achever l'historique des travaux relatifs aux courants. En 1856, Bailey examinant au microscope les 39 échantillons de fonds rapportés par le commandant Berrymann du bâtiment américain *Arctic*, à la suite de sondages exécutés entre Terre-Neuve et l'Irlande et relatifs à la pose d'une ligne télégraphique, reconnaît que les grains de sable y sont anguleux. Il en conclut avec raison que, contre le sol, à ces grandes profondeurs, les courants, s'ils existent, doivent être excessivement faibles, garantie précieuse de sécurité pour les câbles destinés à y être immergés.

En 1870, Gwyn Jeffreys et Carpenter, à bord du *Porcupine*, explorent le détroit de Gibraltar et dès l'année suivante, le *Challenger* au moyen de la drague, dresse des roses de courants. Il prouve ainsi le fait de la superposition de courants indépendants les uns des autres et fournit un procédé pour mesurer leurs directions et leurs intensités respectives.

La manière la plus simple d'étudier un courant consiste à jeter à la mer un corps flottant et à noter la direction qu'il prend et la vitesse avec laquelle il est entraîné. Mais pour que la mesure soit

exacte, plusieurs conditions assez difficiles à réaliser sont indispensables. Il faut d'abord que l'observateur soit immobile, qu'il possède un instrument pour fixer une direction, compas ou boussole, et une montre ou tout autre appareil à évaluer le temps. C'est parce qu'ils en étaient dépourvus que les anciens sont restés incapables de découvrir les lois de la circulation.

L'immobilité de l'observateur peut être affirmée si celui-ci demeure sur le rivage mais le cas est restreint aux observations exécutées dans le voisinage immédiat de la terre puisque, déjà même à une petite distance du flotteur, il n'est pas toujours facile de s'assurer que celui-ci marche bien parallèlement au rivage. On se tiendra sur une embarcation mouillée et cependant là encore, l'observation est limitée aux petits fonds. Si l'on opère au large, on se rappellera le conseil déjà donné de se servir comme point sensiblement fixe, de la nasse profonde. A la rigueur, on installerait une bouée supportant une corde liée à un sac rempli de pierres qu'on enverrait au fond et que rien n'empêcherait d'abandonner après l'opération. Les Américains ont imaginé le flotteur de Mitchell constitué par deux récipients cylindriques de même surface, reliés par un fil métallique. Une cordelette divisée, quelquefois en coton afin de ne point se contracter quand elle est imbibée d'eau, est attachée au récipient supérieur tandis que son autre extrémité reste entre les mains de l'observateur qui la laisse filer petit à petit. On relève la direction au compas et on mesure la vitesse avec une montre à secondes. Les Américains amarraient leur embarcation au câble qui, pendant un dragage, retenait la drague au fond. Avec cet appareil, on obtient les éléments d'un courant à n'importe quelle profondeur. On commence par mesurer le courant de surface ou plutôt la moyenne entre celui qui règne tout à fait à la surface de l'eau et celui à 5 mètres de profondeur ce qui se fait en espaçant de cette longueur les deux récipients. Cette valeur obtenue, on opère à n'importe quelle profondeur ; il suffira d'allonger le fil. Le récipient inférieur sera poussé par le courant supérieur, le récipient inférieur, de même surface, subira l'impulsion du courant inférieur de sorte que l'ensemble du système

prendra une direction intermédiaire que l'on fixera graphiquement et que l'on remplacera par ses deux composantes suivant la loi du parallélogramme des forces. L'une de ces composantes est déjà connue puisqu'elle représente le courant superficiel objet d'une expérience préliminaire ; la seconde est le courant cherché en direction et en intensité.

Un autre procédé consiste à employer la drague à courants composée de deux cadres en bois croisés à angle droit et portant une toile à voile huilée bien tendue. On leste avec un poids, on attache à une corde, on descend à la profondeur voulue et on fixe à une bouée flottante facile à distinguer.

M. Hautreux a simplifié le système de Mitchell en se bornant à attacher par couple à l'aide d'une ficelle de longueur variable, deux bouteilles quelconques, bouteilles à vin ou bouteilles à bière, pourvu qu'elles soient de même dimension et de même forme. L'une vide descend à la profondeur choisie ; la seconde, bouchée après avoir été à demi remplie d'eau reste à la surface et sert de bouée. Drague, flotteur de Mitchell ou bouteilles accouplées, ces procédés sont encore les moins coûteux et les plus précis de tous ceux qui servent à mesurer des courants.

On emploie aussi des flotteurs libres qu'on abandonne en un point connu de l'océan et qu'on fait renvoyer, ou du moins le papier que contient chacun d'eux, à une certaine adresse, avec indication du lieu et de la date de la découverte, par ceux qui tôt ou tard les trouvent échoués sur une plage. En cours de voyage, chaque jour à midi, tout bâtiment de guerre allemand jette à la mer une bouteille avec prière au découvreur d'expédier le billet qui y est contenu au *Deutsche Seewarte* de Hambourg ou au consul allemand le plus voisin. Ces données permettent de tracer la trajectoire du flotteur, c'est-à-dire la direction et la vitesse du courant. Le Prince de Monaco a pris pour ses expériences dans l'Atlantique nord des sphères de cuivre et des barils. On s'est servi de bouteilles accouplées Hautreux ; les Américains ont préféré des tubes en verre de forme spéciale et, pour l'étude des courants avoisinant le pôle, de solides barils cerclés de fer qu'on

immergeait au détroit de Behring et qu'on espère retrouver au détroit de Danemark ou sur les côtes du Groenland. Quel que soit le flotteur et sauf conditions particulières comme à travers la mer polaire, le système laisse prise à la critique parce que si l'on est certain du lieu et de la date du départ, on ne connaît que le point d'arrivée et l'on reste sans aucune notion de la trajectoire suivie. De plus, on n'obtient qu'une évaluation très grossière de la durée du voyage parce que le flotteur échoué sur un rivage peu fréquenté a souvent attendu longtemps avant d'être découvert. Celui qu'on trouverait en pleine mer donnerait de meilleurs renseignements mais quel navire consentirait à s'arrêter pour le recueillir ? Un autre reproche à leur adresser est que, plongés dans la couche absolument superficielle de la mer et en partie à l'air, ils renseignent à peu près autant sur les courants aériens, c'est-à-dire le vent, que sur les courants de l'eau. Leurs indications sont un mélange de météorologie et d'océanographie et comme il n'est pas possible de faire la part de ce qui revient à l'une et à l'autre, elles sont aussi insuffisantes pour l'une que pour l'autre.

Les résultats sont meilleurs avec les épaves des navires naufragés qui plongent presque entièrement dans l'eau et sont, par conséquent à peu près soustraites à la poussée des vents. Elles sont un danger pour la navigation, aussi les bâtiments qui passent à portée ne manquent pas de les observer pour les éviter et, s'ils les signalent, il devient possible, ce qui est un avantage considérable, de tracer, ainsi que le font régulièrement les Américains sur leurs Pilot-Charts, leur trajectoire par points. C'est pourquoi j'avais été amené à préconiser l'usage d'épaves artificielles, doubles barriques accouplées à la façon des bouteilles d'Hautreux, sans danger pour les navires qui les heurteraient, numérotées et peintes en couleurs visibles de loin, servant en même temps à distinguer leur nationalité c'est-à-dire à indiquer l'endroit où devrait être envoyé l'avis de leur rencontre.

Un autre procédé pour mesurer les courants est celui du point. Chaque jour à midi, les bâtiments à la mer font le point à l'aide d'observations astronomiques, c'est-à-dire calculent l'endroit où

ils se trouvent au milieu de l'océan et le marquent sur la carte. Pendant le reste de la journée, sans interruption, des timoniers notent la vitesse du navire et les directions suivies relevées au compas. On reporte sur la carte, à partir du point initial, cette route dont l'extrémité marque l'endroit où est le navire à midi, le lendemain. Mais, d'autre part, on peut comme la veille déterminer ce point astronomiquement, au même moment. Le plus souvent, les deux points, l'un estimé, l'autre calculé, ne coïncident pas. On attribue leur écart à l'action du courant et on le fait servir de mesure, en direction et en intensité, à ce courant. Le procédé est très insuffisant, il n'est en réalité qu'une totalisation d'erreurs : erreurs d'observations et de calculs astronomiques et erreurs dans les évaluations directes de la timonerie relativement à la route. Les mesures de courants faites de la sorte, ne sont que de grossières approximations.

Le mesureur de courants superficiels et profonds d'Aimé était constitué par un moulinet orienté et mis en mouvement par le courant et dont le nombre de tours pouvait être évalué, ce qui fournissait la direction suivie par l'eau et sa vitesse. Cet appareil n'échappait pas à de graves critiques qui, il ne faut pas se le dissimuler, peuvent encore être adressées aux perfectionnements nombreux apportés par Arfwedson, puis par le commandant Pillsbury et par l'amiral Makarow lequel, dans le Bosphore, notait les tours d'ailettes au moyen d'un timbre, enfin par les nombreux inventeurs de compteurs de courants électriques. Quand un appareil ne fournit que des approximations, autant le prendre simple que compliqué; il coûte moins cher, est plus commode à manœuvrer et, au total, donne presque toujours des indications plus voisines de la vérité à cause même de sa simplicité.

Quand on a mesuré la direction et la force de courants suivant une même verticale, on représente graphiquement les résultats en traçant à partir d'un point considéré comme point initial et pour les diverses profondeurs observées, des droites divergentes dans les directions mêmes constatées et de longueurs respectivement proportionnelles à l'intensité de ces courants. C'est ce qu'on nomme

une rose de courants, schéma facile à comprendre et ayant l'avantage, comme tous les graphiques, de parler aux yeux et de montrer immédiatement l'ensemble des faits.

Tous ces procédés renseignent sur les courants superficiels et sur ceux existant jusqu'à une certaine profondeur. Il serait imprudent de vouloir, dès maintenant, les employer trop bas dans la crainte de variations probables qu'il serait impossible non seulement d'évaluer, mais même de constater. Pour la véritable circulation abyssale, d'autres méthodes serviront. Néanmoins si ces expériences étaient faites en assez grand nombre, elles ne manqueraient pas de jeter une vive lumière sur les phénomènes dynamiques superficiels. On connaît si peu les courants dans les parages même les plus fréquentés! On pense avec regret qu'il suffirait, par exemple, de sept ou huit roses de courants, jusqu'à 400 ou 500 mètres de profondeur, à quelques milles de terre, entre Gênes et le cap Creus, devant notre Toulon, devant notre Marseille, pour fournir sur l'économie des courants en Méditerranée, plus d'indications précises qu'on n'en a recueilli et qu'on n'en possède depuis le commencement du monde. Nous n'avons rien qu'un ramassis d'indications souvent contradictoires, dénuées de sanctions sérieuses, la plupart copiées les unes sur les autres et aussi dignes de confiance les unes que les autres.

Il est inutile d'essayer de décrire ici en détail ce qu'on connaît relativement aux courants, au point de vue pratique. Il suffira de rappeler que la circulation superficielle est essentiellement la même dans chacun des cinq grands bassins océaniques : Atlantique nord et sud, Pacifique nord, Pacifique sud et océan Indien. Le Gulf-Stream dont le trajet est connu de tous, pourra servir de type. Partout l'eau court d'est en ouest le long de l'équateur, monte dans les bassins septentrionaux ou descend dans les bassins méridionaux, le long des côtes faisant face à l'Est, parvient à la latitude de 45 degrés environ, prend en sens inverse une marche parallèle à l'équateur et redescend en suivant les côtes faisant face à l'ouest pour fermer le cycle et le recommencer. Dans l'océan Indien, le régime différent de la mousson d'hiver et de la

mousson d'été introduit une variation particulièrement considérable surtout dans le contre-courant limité au bassin secondaire compris au nord d'une ligne joignant Zanzibar aux îles de la Sonde jusqu'aux rivages méridionaux de l'Asie, Arabie et Inde. Nous n'insisterons pas sur l'importance du rôle géographique et social joué par les courants sur le globe entier. Il serait intéressant de montrer dans chaque partie du monde, leur influence sur l'histoire du peuplement et du développement de la civilisation. Partout cette histoire est la conséquence des courants aériens et des courants marins qui ne sont d'ailleurs qu'un phénomène unique sous ses deux manifestations. On citerait à ce propos, les migrations polynésiennes et malaises dans le Pacifique, les thalassocraties grecques, phéniciennes et carthaginoise en Méditerranée, la découverte et la colonisation de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud, les progrès du commerce maritime pendant l'antiquité et le moyen âge entre l'occident et l'extrême Asie, à travers l'océan Indien. Par la température chaude ou froide qui est la principale caractéristique et qui donne presque à chaque courant une faune et un plankton particuliers, ils ont réglé la répartition des îles de corail et, en y transportant des graines, ils les ont rendues fertiles et ont permis à l'homme de les habiter. Martins a jeté 94 graines diverses dans de l'eau de la Méditerranée, 39 ont enfoncé, 55 ont flotté et, de ces dernières, 18 ont pu germer après six semaines de séjour et 7 après trois mois. Les bois qui couvrent les rivages de l'Islande, de Jan Mayen, de Bären Eiland, du Spitzberg et qui rendent tant de services à ceux qui vivent dans ces contrées désolées, sont apportés en grande partie de l'Orénoque et du Mississipi par le Gulf-Stream. Les migrations des harengs, morues, sardines et autres ne sont que la conséquence des variations des courants. Il en est de même de l'abondance des poissons à Terre-Neuve, aux Canaries, au banc des Aiguilles. La base rationnelle de l'exploitation de la mer, l'industrie des pêches est entièrement une affaire de courants. Quand on aura élucidé l'économie générale de ceux-ci, circulation superficielle et circulation profonde, on saura tout ce qu'il y a lieu de connaître non

sur tel ou tel poisson particulier mais sur tous les poissons quels qu'ils soient. Une fois la théorie élucidée et les cartes dressées, les applications ne présenteront plus de difficultés. Il faut procéder avec méthode ; la ligne droite n'est pas toujours le plus court chemin vers un but déterminé et ces questions qui intéressent au plus haut point les problèmes sociaux sont trop graves pour qu'on ait le temps de se trop presser de les vouloir résoudre.

Les Américains ont admirablement étudié le Gulf-Stream, cette masse d'eau qui au détroit de la Floride coule avec une vitesse moyenne annuelle de 72 milles par vingt-quatre heures et qui atteint jusqu'à 100 et 120 milles, soit 1 m. 5 à 2 m. 5 par seconde, celle du Rhin en temps de hautes eaux, puis se ralentit de manière à ne plus faire, au sud de Terre-Neuve, que 1 mille à l'heure. Borné à l'ouest par le Cold Wall qui longe du nord au sud les côtes des États-Unis et dont les eaux sont de 10 à 15 degrés moins chaudes, le Gulf-Stream arrive jusque sur les bancs où, mélangé aux eaux glacées du courant du Labrador contournant à l'est et à l'ouest l'île de Terre-Neuve, refroidi par les icebergs de la mer de Baffin et par les glaces côtières, il donne naissance à d'épais brouillards. Particularité curieuse et néanmoins facilement explicable, tout différent en cela des fleuves terrestres, le fleuve marin monte la pente de son lit. Si près de la Floride sa vitesse ne s'annule que vers 1 100 mètres de profondeur, déjà au cap Hatteras, il se ramifie en branches divergentes, diminue d'épaisseur et, après Terre-Neuve, il ne fait que s'étaler à la surface, il n'est plus qu'une dérive. Cependant par la chaleur qu'il porte alors de l'Équateur sur les côtes européennes, il donne leur climat, c'est-à-dire leur état de civilisation à l'Espagne, à la France, aux îles Britanniques, à la côte de Norvège qu'il frappe directement et où, s'opposant à la prise par la glace des fjords, il rend la navigation possible pendant l'année entière et fait des Norvégiens un peuple de marins. Il s'écoule ensuite jusque par delà la Nouvelle-Zemble où il a permis, depuis le périple de Nordenskjöld, d'ouvrir au trafic maritime, d'une manière bien précaire il est vrai, les régions sibériennes des embouchures de l'Obi et de l'Iénisséi. C'est encore

lui dont les dernières dérives, prenant après avoir baigné la Sibérie, directement le chemin du pôle boréal, remplissent le bassin arctique où Nansen a eu la gloire de découvrir une profondeur dépassant 2 900 mètres et en sortent, comme un torrent, le long de la côte orientale du Groenland, par le détroit de Danemark, entre l'Islande et le cap Farewell. Si, comme rien n'empêche de le croire, le travail incessant des coraux interceptait le passage du Gulf-Stream, à son étranglement du détroit de la Floride, et forçait la masse d'eau chaude à se déverser plus au sud en l'empêchant de s'étaler en dérive, tout l'équilibre européen serait modifié par ces infiniment petits. L'Espagne et le Maroc se transformeraient en fournaises comme le Sénégal tandis que la France se refroidirait et l'Angleterre ainsi que les contrées septentrionales, aussi bien celles baignées directement par la mer que celles qui, situées en arrière bénéficient aujourd'hui en l'atténuant, du climat de celles qui les couvrent, deviendraient glaciales, prendraient un climat peut être analogue à celui du Kamtchatka situé à la même latitude. Toute la répartition géographique de la civilisation serait changée et pourtant rien ne serait visible sur la carte, on n'apercevrait aucune modification au contour actuel des continents. Se décidera-t-on à aborder les détails maintenant que les généralités sont connues. Des marins ne seront-ils pas tentés, dans des séries de monographies, d'étudier le régime océanographique de régions restreintes et nettement délimitées, les mers de Chine, du Japon, d'Okhotsk, de Behring, la mer de Baffin, si mal connue, le golfe Persique ? Sans compter les Américains, l'exemple a été donné par l'expédition norvégienne du *Vöringen* qui a si habilement exploré le bassin arctique compris entre la mer du Nord et le Spitzberg, par les Anglais qui examinent sans relâche le golfe du Bengale, par les Autrichiens qui ont fait l'océanographie de la Méditerranée orientale et de la mer Rouge. Quand s'occupera-t-on de celle de la Méditerranée occidentale, si facile, si peu lointaine, que les Latins appelaient *Mare nostrum!* Les documents condensés, simplifiés et parfaitement rigoureux seraient alors livrés aux géologues qui s'en serviraient pour faire de la vraie géologie,

histoire d'un passé vieux de millions d'années, et aux historiens pour faire l'histoire du passé récent, à peine âgé de quelques milliers d'années. Comme tout cela semble clair et évident et combien on demeure attristé quand on considère le temps qu'il faut aux hommes pour voir la clarté et comprendre l'évidence !

Cherchons à découvrir les causes multiples de la circulation océanique superficielle.

La première, la plus active est le vent. Quand sur la mer passe une brise légère, la moindre risée folle, l'eau se couvre aussitôt de rides et si quelque épave, quelque paquet d'algues flottent à la surface, ils fuient aussitôt devant ce souffle. Que l'on superpose sur un planisphère le tracé des vents réguliers tel qu'il est donné par les météorologistes et celui des courants dressé par les océanographes ou les marins, on reconnaîtra leur coïncidence. Déjà pour les Grecs c'était Borée qui soulevait les vagues et poussait les courants. Franklin affirma de nouveau le fait et il n'eut besoin, dit-on, pour cela, que de regarder la pièce d'eau des Suisses à Versailles. La question est de toute évidence.

Mais puisque les vents dans leur cours régulier sur le globe sont la cause principale des grands courants marins, il importe de savoir jusqu'à quelle profondeur s'exerce leur action. Zöppritz a traité le problème par les mathématiques. Se plaçant dans les conditions idéales d'une masse d'eau absolument calme, sans limites en superficie comme en profondeur, il a démontré qu'un vent soufflant au-dessus d'elle d'une manière continue, pendant un temps infini, sans éprouver aucune variation dans sa direction ni dans son intensité, la vitesse se propagerait au sein du liquide en diminuant de haut en bas et que l'état stationnaire ne serait établi que lorsque la vitesse de la couche immédiatement superficielle serait exactement égale à celle de l'air, c'est-à-dire après un temps infiniment long. Avec une nappe d'eau de profondeur limitée, les temps pour ne plus être mathématiquement infinis sont néanmoins bien près de l'être. Ainsi dans une nappe de surface illimitée et épaisse de 4 000 mètres, reposant sur le sol, l'état stationnaire ne s'établirait que deux cent mille ans environ après que l'eau de

la surface, primitivement au repos, aurait pris une vitesse uniforme. En cent mille ans, l'état stationnaire ne serait pas atteint à 200 mètres où, au bout de dix mille ans, on n'aurait encore que les 37 millièmes de la vitesse de l'eau à la surface.

La vitesse à la surface étant égale à l'unité met plus d'un mois à être communiquée à l'eau située à 1 mètre au-dessous. Après environ cinq mois, à 10 mètres de profondeur, la vitesse n'est encore que la dixième partie de la vitesse superficielle. Il faudra vingt-neuf mois pour qu'elle n'en soit que la moitié et deux cents trente neuf ans pour que ce dixième de la vitesse superficielle parvienne à 100 mètres de profondeur.

Si, sortant du domaine de la mathématique pourtant très suggestif en cette circonstance, cessant de considérer les conditions idéales d'un océan où tout est infini, agité par un vent conservant pendant un temps infini la même force et la même direction, on retourne à la réalité et qu'on considère les variations continuelles du vent sur le globe, du jour à la nuit, de l'hiver à l'été, conséquences des mille complications qui surgissent sous l'influence de mille causes naturelles, qui lui donnent souvent des directions diamétralement opposées, qui détruisent et annihilent les actions produites par des actions antagonistes, on sera amené à une conclusion fatale. Les vents sont, il est vrai, la cause immédiate, directe des courants superficiels mais leur action devient nulle à une distance relativement très petite de la surface. Certes l'épaisseur agitée doit être variable en des points différents selon le climat et il appartient à une expérience que nous ne possédons pas encore de déterminer par des constatations directes cette profondeur locale d'après la moyenne des conditions ambiantes. Cependant on est en droit d'admettre qu'elle est très réduite. Il est douteux que nulle part elle dépasse de beaucoup un millier de mètres. On pense que les courants équatoriaux de l'Atlantique ont une vitesse à peine sensible entre 120 et 150 mètres et tout à fait nulle entre 180 et 200 mètres.

Si les courants n'avaient d'autres causes que le vent, ils auraient sur le globe une unité de distribution qu'ils sont loin de posséder.

S'effectuant sur de l'eau, fluide plus lourd, plus compact, moins capricieux que l'air, la circulation océanique serait la contre-partie atténuée, régularisée de la circulation aérienne. Il est loin d'en être ainsi et une foule de circonstances dont les principales seulement seront mentionnées, vont introduire dans cette simplicité de nombreuses complications.

La première est l'influence de la diversité de poids spécifique des diverses eaux marines. La mer est moins salée sur les bords des continents qu'au large parce que les fleuves se déversent le long des côtes. On admet que l'eau météorique tombée sous forme de pluie ou de neige sur les continents se partage en trois parties sensiblement égales. Un tiers s'évapore immédiatement et se diffuse en vapeur dans l'atmosphère. Un autre tiers coule à la surface et tôt ou tard, après avoir été ruisseau, lac et rivière, il devient fleuve et arrive à l'océan. Le dernier tiers est absorbé par le sol. Mais à l'exception d'une minime partie qui, comme eau d'hydratation se combine avec les minéraux, y demeure à jamais fixée et est par conséquent soustraite à tout mouvement ultérieur, les eaux d'imbibition s'enfonçant jusqu'à la rencontre d'une couche imperméable, reviennent au jour à l'état de sources minérales ou autres et rentrent alors dans le cycle ou bien coulent souterrainement jusqu'à ce que, à une profondeur plus ou moins grande, elles parviennent au contact du fond océanique et, par un suintement continu, se mêlent aux eaux salées. On a découvert en plusieurs localités des sources sous-marines dont l'existence est absolument hors de doute. Dans ce cas l'eau douce plus légère remonte en se mélangeant avec le liquide salé ambiant. On a parlé aussi de fleuves souterrains débouchant sous la mer par un orifice assez large pour laisser passage à des troncs d'arbres. Il est difficile de croire que des arbres soient entraînés de la surface du sol dans ses profondeurs, poursuivent ensuite leur route dans un canal assez régulier et assez spacieux pour ne pas les arrêter et gagnent enfin la mer par une ouverture dont jamais on n'a constaté la réalité et qui devrait pourtant se traduire par des phénomènes très distincts à la surface de l'eau, îlots d'eaux de salure réduite et troublées

par des boues remuées ou charriées pendant le trajet. Élucider le détail de ces faits est une tâche qui revient aux géologues. Ils y arriveront certainement par la double considération de la direction et du plongement des couches dans la zone continentale côtière et de leur rencontre probable avec le relief de la mer voisine.

Quoi qu'il en soit, on est amené à conclure que les deux tiers de l'eau tombée sur les continents sont déversés dans la mer soit à l'air libre, soit sous-marinement, le long des côtes. Il en résulte une conséquence importante.

On sait que les hauteurs de deux liquides différents contenus dans deux vases communiquants sont en raison inverse des densités de ceux-ci. Or, l'eau du bord mélangée d'eau douce et l'eau du centre non mélangée et en outre concentrée par l'évaporation qui, sous les tropiques enlève annuellement une couche épaisse de 2 à 3 mètres et même de 7 mètres dans la mer Rouge, sont bien deux liquides différents. La portion superficielle de la masse océanique est comparable à une immense suite de vases communiquants dans lesquels les surfaces seront à un niveau d'autant plus bas que les eaux y seront plus salées et d'autant plus haut qu'elles seront moins salées. En résumé, le centre des océans constituera une sorte de cuvette à bords relevés dont les portions hautes seront représentées par les régions océaniques côtières. Mais comme le creux et les bords, au lieu d'être solides, sont liquides, que les eaux y sont sans interruption concentrées d'un côté, étendues de l'autre, que leur mélange s'effectue physiquement par diffusion, mécaniquement par le brassage dû aux vagues et par mille autres causes, le niveau tend sans cesse à s'établir par la création d'un courant continu partant des côtes et se dirigeant vers le centre des océans. On ignore la profondeur du plan de densité égale commune; il n'est pas impossible que cette profondeur qu'on a essayé d'évaluer théoriquement dépende en réalité de tant de conditions qu'elle varie en un même endroit à des moments différents et ne soit pratiquement indéterminable. Quelle que soit l'opinion adoptée, il est évident qu'une circulation continue de la périphérie des océans

vers leur centre va se superposer à la circulation due aux vents et en modifier l'économie. C'est cette irrégularité du niveau océanique qui a autorisé à comparer l'aréomètre qui la mesure au baromètre qui mesure les altitudes continentales.

Une autre cause permanente de modification est la rotation terrestre. Le globe tout entier tourne d'est en ouest; il entraîne dans son mouvement la masse des eaux et celle-ci, en conséquence de son inertie, subit un retard se traduisant par une marche générale d'est en ouest. Le même phénomène se produit, dit-on, pour les rivières dont le cours est dévié et qui empiètent sur l'une ou l'autre de leurs rives suivant l'orientation de leur cours à la surface du globe et l'hémisphère où elles sont situées.

Une troisième cause est l'action de la température qui échauffe les eaux près de l'équateur, les dilate et par conséquent les rend plus légères. Il est vrai qu'en même temps la chaleur active l'évaporation qui concentre les eaux et par conséquent les alourdit. Les deux facteurs sont donc antagonistes et il y a lieu d'y ajouter, dans les régions équatoriales, la chute des pluies qui persiste sans interruption pendant la durée entière de l'année quoiqu'elle soit variable comme quantité et comme position géographique selon les saisons. Dans l'Atlantique, on a dressé pour chaque trimestre correspondant à chaque saison, les zones de pluies équatoriales tombant pendant sept heures et pendant quatre heures par jour. Ces aires concentriques l'une à l'autre et toutes deux sous l'étroite dépendance des alizés de nord-est et de sud-est, oscillent entre la côte ouest d'Afrique, Sénégal et Guinée, et celle du nord-est de l'Amérique méridionale entre le cap San Roque et le Vénezuéla. Des torrents d'eau douce sont ainsi ajoutés à la mer ce qui, pour continuer la comparaison précédente, autoriserait à identifier l'Atlantique sud, non à une cuvette simple, mais à un système de deux cuvettes séparées par une crête située un peu au nord de l'Équateur. Dans les régions boréales et australes la formation et la fusion annuelles des glaces introduisent un nouvel élément de perturbation. En effet, quand les glaces se forment sur la mer, comme elles sont plus riches en eau douce que la saumure restée liquide,

elles concentrent le sel dans cette dernière et l'alourdissent d'autant. D'autre part le froid contractant l'eau en augmente la densité, l'oblige à descendre et devient encore une cause de mouvement local au début et ayant ensuite sa répercussion sur les phénomènes de la circulation générale. Au moment de la fusion, d'énormes quantités d'eau presque douce sont, au contraire, ajoutées à la mer.

On a vu que l'onde de marée donnait naissance, au voisinage de la terre à des courants tournants dits de marée. Ce phénomène est une conséquence de la diminution de profondeur de l'eau. Venant se superposer aux phénomènes réguliers de la circulation, il en augmente encore la complication; il est local quoique permanent au même point. Du reste l'influence du rapprochement du fond ralentissant le mouvement des couches d'eau contiguës au sol sans modifier théoriquement celui des couches supérieures et néanmoins accélérant en réalité le mouvement de ces dernières par suite de l'accumulation du liquide, se produit alors fatalement. Elle se fait sentir sur un courant quel qu'il soit et indépendamment de toute action de marée.

Il existe d'autres causes de modifications à la circulation. D'après les lois mécaniques du frottement, un courant donne forcément naissance à un contre-courant de sens inverse, de vitesse moindre et s'atténuant de plus en plus dans la région centrale si le courant originel est circulaire comme c'est le cas pour les cinq grands circuits océaniques. Ces portions calmes facilitent le groupement au centre des corps primitivement flottants à la périphérie. L'exemple le plus typique est celui de la mer des Sargasses si bien connue depuis les travaux de Krümmel. On donne le nom de Sargasses ou de raisins des tropiques à des rameaux entiers de plantes marines, *Sargassum vulgare*, *Sargassum bacciferum*, *Sargassum ilicifolium*, *Sargassum latifolium* et *Sargassum obtusatum*, arrachées par les tempêtes aux rochers où elles croissent sur les rivages des États-Unis depuis le cap Cod, du golfe du Mexique et de la mer des Caraïbes, c'est-à-dire la côte du Vénezuéla y compris les Grandes et les Petites Antilles. Elles sont saisies par les courants

et entraînées dans le circuit de l'Atlantique nord. Comme les eaux de ce circuit sont plus chaudes que celles qui les environnent, surtout dans le Gulf-Stream, entre le détroit de Bahama et les bancs de Terre-Neuve, elles forment un bombement à double pente dont l'une, la plus douce, est intérieure, c'est-à-dire dirigée vers le centre de l'Atlantique. Les sargasses ainsi que les autres épaves tendent donc à gagner cette région et dans l'impossibilité où elles sont d'en sortir, s'y cantonnent jusqu'au jour où elles finissent par descendre au fond. La mer des Sargasses était l'effroi des marins de l'antiquité qui n'en ignoraient pas l'existence et elle faillit provoquer la plus grave des rébellions des matelots de Colomb, lors de son premier voyage. Krümmel en a dressé la carte et a limité par des courbes les aires de fréquence de rencontres de Sargasses par les navires. Quatre de ces aires ont été ainsi définies à la suite du dépouillement d'innombrables journaux de bord; elles entourent régulièrement comme les aires isohypses d'une vallée, la région centrale de calme, le creux de la cuvette de l'Atlantique nord.

La configuration géographique des continents impose aux courants leur route et, quand il existe des golfes plus ou moins considérables comme ceux de Guinée, du Bengale, de l'Alaska ou de Gascogne, cette configuration se combinant à la diminution de profondeur, aux marées et aux contre-courants constitue une circulation spéciale de courants de déviation qu'il serait bien désirable de voir faire l'objet d'études monographiques particulières. La rencontre de la côte par un courant la heurtant perpendiculairement ou sous un angle assez grand est quelquefois susceptible de séparer ce courant en deux autres de direction opposée et de force variable avec l'inclinaison sous laquelle le courant initial frappe la terre. Il en est de même des mers fermées, sortes de bassins dans le genre des mers de Chine, du Japon ou des Antilles, possédant chacune leur circulation spéciale.

Tout courant étant un apport d'eau, vide une portion de l'océan et amène sur un point un excès de liquide. Comme l'équilibre tend sans cesse à se rétablir, il en résulte un apport d'eau en

UN REQUIN PRIS AU TRAMAIL

UNE PÊCHE DE SARDINES

sens inverse appelé courant de compensation ou de réaction.

Telle est dans ses grands traits la circulation superficielle. On voit combien elle est compliquée et il n'en peut être autrement. La multiplicité des causes a pour conséquence la complication des effets. Là encore on en est réduit à étudier séparément d'une manière empirique, par des mesures directes, chaque courant en chacun de ses points et à en dresser les cartes dont la nécessité pratique impose la construction. La théorie offre l'avantage d'expliquer les anomalies, s'il s'en rencontre, mais elle n'est capable de rien de plus. Tant de variables se combinent entre elles et elles dépassent tellement l'entendement humain qu'elles obligent à la plus extrême prudence dans les considérations a priori qu'on serait tenté de formuler.

Avant d'en finir avec la circulation superficielle, on mentionnera un appareil très simple appelé à rendre des services lorsqu'on voudra, empiriquement, obtenir une notion approchée de la marche des courants superficiels dans un bassin géographique quelconque bien délimité. Il se compose d'une cuve rectangulaire ou carrée en verre, peu profonde, étanche et dans laquelle on verse une couche d'eau épaisse de quelques centimètres. Avec des bandes minces de plomb, on imite le contour continental du bassin et on dispose celles-ci verticalement dans la cuve de manière à reproduire l'image du coin d'océan à étudier. On répand sur l'eau de la râpure de liège, on produit le courant principal avec un soufflet, les râpures indiquent le mouvement et le continuent en le modifiant au voisinage des lames de plomb. Rien n'est alors plus facile que de suivre des yeux le trajet des courants résultants.

L'expérience a montré qu'à quelques brasses à peine de profondeur les courants marins peuvent être très différents en direction et en intensité de ce qu'ils sont à la surface même. Faudra-t-il dès lors considérer les courants autres que ceux qui concernent la pellicule même de l'eau comme appartenant à la circulation profonde? La limite difficile à établir est sans importance sauf pour rendre plus compréhensible l'exposé des faits et pour cela, elle n'a pas besoin d'être si précise. En définitive, circulation superficielle et

circulation profonde sont les deux parties d'un même ensemble, d'une même unité, la circulation océanique.

Existe-t-il des courants profonds parcourant la masse des eaux, montant et descendant, comparables à une colonne de fumée qui, dans l'atmosphère, tout en s'atténuant peu à peu, décrit ses sinuosités irrégulièrement dans des plans différents? L'affirmation n'est pas douteuse; elle résulte de l'observation. Et de plus, les courants ont-ils un commencement et une fin?

Considérons par exemple le courant du Labrador. Il sort de la mer de Baffin produit par la fusion des glaces polaires ou peut-être encore constituant une issue latérale des eaux du bassin arctique. Il suit la côte du Labrador, arrive à Terre-Neuve et là, se sépare en deux. Une partie franchit le détroit de Belle-Isle, remplit le golfe du Saint-Laurent et en sort par le détroit de Cabot, entre la Nouvelle-Écosse et le cap Race. Le reste longe la côte orientale de l'île. Sur l'emplacement des bancs, les deux branches heurtent à peu près perpendiculairement le courant chaud du Gulf-Stream. Les détails locaux mériteraient d'être élucidés au moyen d'analyses d'eaux recueillies en séries. Il est probable que des variations ont lieu aux divers moments de l'année et l'étude en serait aisée, car il s'agit d'eaux de nature très différente, les unes très froides et peu chargées en sel, les autres chaudes et au contraire assez salées. Il y a là le total de deux additions algébriques. La chaleur plus grande et la salinité plus faible rendent l'eau plus légère, tandis que le froid et la salinité plus forte l'alourdissent. Nous ignorons la part à faire à l'une et à l'autre propriété dans chacune des deux eaux, ce qui serait justement l'intérêt de l'étude sur place, mais en revanche nous connaissons le résultat final. L'eau du courant du Labrador, sans doute à cause de sa basse température et malgré sa faible salure qui tendrait à l'empêcher de descendre, descend; l'eau du Gulf-Stream malgré sa plus forte salinité demeure à la surface à cause de sa température. Le courant du Labrador passe par-dessous celui du Gulf-Stream et continue sa course dans la direction probable du Sud-Est. On ne sait la profondeur qu'il atteint, mais il y a lieu de supposer qu'arrivé à un certain niveau,

soit par réchauffement, soit à cause de sa faible salinité, l'équilibre de température s'effectuant plus rapidement que l'équilibre de salinité, il se rapproche de la surface et c'est peut-être lui qui apparaît au jour entre les îles Canaries et la côte d'Afrique sous la forme d'un îlot d'eau froide bien connu des marins et surtout des pêcheurs parce qu'il fourmille de poissons dont la pêche est à peu près l'unique richesse de la région. J'ai quelques motifs de croire avoir des preuves de sa présence à un millier de mètres de profondeur dans l'ouest de l'Archipel des Açores placé lui-même dans un remous de ce courant.

Les courants s'échappant des glaces de la mer polaire sont à peu près dans le même cas. Ils naissent aux confins de la banquise et de la mer libre, provoquent la curieuse disposition en coin traduite par les isothermes des couches d'eau voisines dont la température subit une sorte de coude et, au delà, s'enfoncent à une profondeur inconnue. Il est douteux que cette eau soit immédiatement incorporée à la masse des autres eaux ; elle doit continuer sa route vers l'équateur non pas au fond, comme on l'avait pensé, mais peut-être dans une zone intermédiaire jusqu'à ce qu'elle se confonde peu à peu dans la masse océanique ambiante. Là encore, il y a courant sous-marin et circulation profonde.

S'il fallait d'autres exemples, on citerait le courant inférieur salé du détroit de Gibraltar se dirigeant de l'est à l'ouest en sens diamétralement inverse du courant supérieur allant de l'Atlantique à la Méditerranée. On parlerait aussi des courants du Bosphore.

Les courants volcaniques constituent une troisième espèce de courants profonds. D'une façon générale, la densité normale de l'eau de mer décroît de la surface au fond. Cette faible densité combinée à la température basse des couches profondes, à la pression exercée par les couches sus-jacentes et à la diminution de volume qui en est la conséquence, immobilise cette eau sur le fond. Mais si en un point quelconque, dans une région d'activité volcanique, le sol échauffé communique sa chaleur à l'eau en contact avec lui, celle-ci devenue plus légère, remontera. Selon la profondeur de la mer et la colonne d'eau située au-dessus, elle

atteindra la surface où, comme pendant l'éruption de la montagne Pelée à la Martinique en 1902, on lui a trouvé une température de 45 degrés et on lui a vu produire un courant superficiel de 3 nœuds à l'heure, ou bien, se refroidissant, si la couche d'eau à franchir est très épaisse, elle prendra petit à petit la température ambiante et, sans parvenir jusqu'à la surface, elle s'écoulera entre deux eaux dans une certaine direction. On a encore, dans ces conditions, un courant de circulation abyssale qui peut se borner à ramper en quelque sorte sur le sol en produisant toute une série de phénomènes spéciaux, transport de ponces, par exemple, et modifications dans la nature lithologique du fond, telles qu'un transport de grains sableux ou tout au moins un lavage des sédiments déjà déposés et un enlèvement des particules vaseuses très fines. Le courant polaire du Labrador avait une source superficielle, descendait puis remontait à la surface où il trouvait son terme ; le courant volcanique au contraire possède son origine au fond et après un parcours plus ou moins long, soit à la surface, soit à travers les couches intermédiaires, il finira à la surface, ou dans la masse même des eaux ou bien encore contre le fond à une distance plus ou moins considérable de son point de départ.

Dans tous les cas l'existence de courants profonds, si peu qu'on les connaisse encore, ne saurait faire l'ombre d'un doute. Leur ensemble constitue la circulation que nous avons appelée abyssale ou profonde.

Comment suivre dans leur marche ces courants dont certains n'atteignent pas la surface ? Mesurer directement leurs caractéristiques aux énormes profondeurs où ils peuvent se trouver semble difficile et d'exactitude douteuse dans les conditions actuelles des instruments de mesure ; il faut, par conséquent, recourir aux mesures indirectes.

L'eau de mer n'étant pas, ainsi que le prouve l'analyse directe, une dissolution plus ou moins concentrée dans de l'eau distillée d'un mélange unique de sels mais variant de composition — quoique légèrement — en chacun des points de sa masse, les éléments composants, pris individuellement, seront capables de servir à

individualiser telle ou telle espèce d'eau de manière à la laisser reconnaître tant qu'elle restera elle-même ou ne se modifiera que progressivement, partout où l'entraînera sa marche. De même sur une place remplie d'une foule nombreuse en mouvement, on reconnaîtra la marche d'une file continue d'hommes, habillés de vêtements bariolés, si on considère séparément chaque pièce de leur costume et si l'on constate pour chacun d'eux, identité de couleur pour la coiffure, identité pour l'habit et identité pour le pantalon, on sera assuré que l'on a bien affaire à une seule et même série d'hommes. Cette donnée est fondamentale, elle a souvent été mal saisie et c'est pourquoi je me permets d'employer pour la faire comprendre, une comparaison familière qui, je l'espère, rendra clairement ma pensée.

Reste à savoir quelles caractéristiques seront prises pour l'eau de mer. Elles doivent répondre à plusieurs conditions : être véritablement caractéristiques, c'est-à-dire n'avoir point de relations les unes avec les autres, être complètement indépendantes les unes des autres, être très nettes, être enfin faciles et promptes à établir.

Les trois caractéristiques que j'ai choisies sont les suivantes :

D'abord la densité normale à la température de la glace fondante. La densité à une température quelconque pourvu que celle-ci fût la même pour tous les échantillons, conduirait au même résultat. La facilité pratique expérimentale m'a décidé à adopter celle de zéro. Cette donnée est représentée par le symbole S°_{4} et on a déjà indiqué la façon de procéder à sa mesure.

La seconde caractéristique est l'halogénie, c'est-à-dire le poids total des corps halogènes, chlore, brome et iode, contenus dans 1 kilogramme de l'eau de mer considérée. La méthode de dosage par une liqueur titrée d'azotate d'argent, décrite précédemment, est facile, précise et prompte. Certains auteurs préfèrent doser la chloruration, c'est-à-dire le poids de chlore seul contenu dans 1 kilogramme de l'échantillon. Pour obtenir ce chiffre ils commencent par doser comme moi le total des halogènes au moyen du chlorure d'argent titré et ensuite, par une correction à l'aide d'une

table préalablement calculée d'après une moyenne d'analyse, ils modifient leur résultat expérimental de manière à ce qu'il n'exprime plus — à leur avis — que le poids du chlore seul. Cette manière de procéder est à la fois inutile et erronée. Inutile parce qu'il n'importe guère que la caractéristique cherchée soit ou le chlore seul ou l'ensemble des halogènes, chlore, brome, iode évalués du même coup. Si le chlore seul, ou le brome seul, ou l'iode seul était plus aisé à doser, on aurait raison de prendre cette caractéristique, mais comme pour avoir la teneur du chlore on commence par mesurer directement l'halogénie, c'est-à-dire l'ensemble du chlore, du brome et de l'iode et que par un calcul d'une exactitude discutée on est forcé de revenir ensuite au chlore sans qu'il y ait à cela le moindre avantage, autant s'en tenir au résultat brut de l'analyse.

En second lieu, la méthode est erronée parce qu'elle admet contre les données de l'expérience que l'eau de mer est une dissolution dans l'eau distillée d'un mélange homogène de sels. Il n'importe pas davantage qu'on ait établi par un certain nombre d'analyses, si précises qu'elles soient, sur un aussi grand nombre qu'on le voudra, d'échantillons pris dans les régions les plus diverses de l'océan, le rapport entre le poids total des halogènes et le poids d'un seul des composants, chlore, brome ou iode. Ce rapport n'est pas constant dans la réalité. On n'aura jamais qu'une moyenne et il ne s'agit point ici de moyenne, de rapport constant, comme si l'eau de mer était de l'eau distillée mélangée avec une quantité variable d'un mélange homogène de sels, mais de valeurs propres, inhérentes à chaque échantillon. Pour reprendre la comparaison de tout à l'heure, pourrait-on reconnaître la file continue des hommes en prenant la moyenne de la couleur des vêtements de tous les individus qui se trouvent sur la place ou d'une partie seulement d'entre eux? On effacerait ainsi volontairement et maladroitement les précieuses différences devant servir à les distinguer les uns des autres. Ce qu'on veut établir est une différence ou une ressemblance entre deux échantillons d'eaux. Est-il admissible que l'on commence par supprimer cette différence en la remplaçant par

une moyenne? Pour ce motif on ne saurait admettre l'emploi de tables donnant les caractéristiques en fonction les unes des autres. Dix, cent valeurs fonctions les unes des autres ne seront jamais qu'une seule et même valeur. Un mathématicien dirait que les variations de deux variables déduites l'une de l'autre sont représentées par une ligne. Or, dans le cas actuel, les variations de deux variables mesurées directement dans une série d'échantillons d'eaux de mer, sont figurées par une surface. Le fait prouvé par l'expérience est indiscutable et condamne, par conséquent, l'emploi de tables de quelque façon qu'elles aient été calculées.

La troisième caractéristique est le poids d'acide sulfurique par kilogramme d'eau de mer. Cette valeur est, elle aussi, facile et prompte à évaluer par une précipitation au moyen du chlorure de baryum suivie d'une pesée du précipité de sulfate de baryte obtenu.

Les trois caractéristiques, densité normale à zéro, halogénie et teneur en acide sulfurique, vont permettre de suivre comme à la piste, la marche d'une même qualité, d'une même individualité d'eau de mer au milieu d'autres eaux et à n'importe quelle profondeur. Elles sont des caractéristiques statiques personnifiant une qualité quelconque d'eau quelle que soit la position qu'elle occupe dans l'océan, mais elles ne fournissent aucune information sur le mouvement de cette eau particulière.

Pour avoir une caractéristique dynamique, on a recours à la densité *in situ* ${}_{n}S_{4}^{\theta}$, c'est-à-dire au poids du décimètre cube ou du litre d'eau de mer dans les conditions mêmes où il est actif au sein de l'océan, c'est-à-dire à la température θ qu'il possédait alors et comprimé sous le poids des couches d'eau comprises jusqu'à la surface ou, en d'autres termes, la profondeur.

Une série d'échantillons étant récoltée et analysée, on représente graphiquement les valeurs trouvées sous les deux formes de séries isolées et de plans parallèles.

Sur une fiche en papier quadrillé on inscrit les indications générales ; numéro de la station, latitude, longitude, position géographique et, s'il y a lieu, nature du fond. Au-dessous, les hau-

teurs verticales ou ordonnées figurant les profondeurs et les abscisses mesurées horizontalement, une donnée quelconque, on marque par des points les résultats d'observation directe pour une autre donnée quelconque. On relie ces points par des courbes faciles à distinguer par leur couleur ou la nature du trait; plein, pointillé ou autre. On a ainsi une courbe correspondant à chacune des variables S_4^0, S_4^0 θ, halogénie et acide sulfurique. La séparation en fiches distinctes et l'identité de l'échelle sur chacune d'elles permettent la comparaison de n'importe quelle série avec n'importe quelle autre série et en outre, le classement des fiches peut s'effectuer de toutes les manières imaginables. La régularité d'une courbe prouve la régularité de la condition qu'elle représente depuis la surface jusqu'au fond. Chaque fois que se manifeste un ressaut, une inflexion brusque, l'attention est immédiatement attirée et aussitôt on compare l'irrégularité avec l'irrégularité, correspondante ou non, des autres courbes inscrites sur la même fiche ou sur des fiches différentes. La courbe donne la notion de la continuité qui est le fait de la nature, le nombre de points jalonnant fournit le poids, le degré de véracité et par conséquent de confiance à lui accorder. Différences et ressemblances apparaissent nettement et les lois se dégagent avec une extraordinaire clarté. Tout est en quelque sorte mathématique non d'une mathémathique idéale, extranaturelle, mais d'une mathématique matérielle, réelle, pratique. Le nombre de fiches sur un espace déterminé indique dès le premier pas, le degré de perfection du travail et presque son degré d'achèvement.

Si la masse des eaux océaniques actuelles était uniformément distribuée sur le globe entier, tous les continents étant supposés arasés de telle façon que la terre soit composée d'une sphère solide partout recouverte d'une même épaisseur d'eau, on a calculé que cette épaisseur serait de 2 300 mètres environ. Dans cet océan, en admettant qu'il y ait uniformité de climat, que les vents et autres causes perturbatrices soient supprimées, l'eau sera distribuée en couches concentriques de densité croissante depuis la surface jusqu'au fond, de même que dans un flacon contenant du mercure,

de l'alcool et du pétrole et agité, le repos une fois établi, le mercure occupera le fond, surmonté par l'alcool, surmonté lui-même par le pétrole. Toutes les conditions physiques et chimiques seront les mêmes pour une même nappe enveloppant la terre entière, à égale distance du centre. L'océan cherche continuellement à atteindre cet idéal, mais il ne l'atteint jamais parce qu'il en est continuellement empêché par les causes déjà énoncées, variété topographique, variété thermique, vents et le reste. C'est par les courants que sans cesse il s'efforce d'y parvenir.

Supposons que pour trois stations modérément distantes l'une de l'autre et non en ligne droite, on possède les graphiques complets du θ, S_4^0, S_4, nS_4^0, de l'halogénie et de l'acide sulfurique entre la surface et le fond. Les trois plans verticaux passant par ces trois points, pris deux à deux, forment les trois faces latérales d'un prisme triangulaire et l'on peut graphiquement les développer sur une feuille de papier où elles se présenteront sous l'aspect de trois rectangles juxtaposés dont chacun sera une section verticale de l'océan.

Par n'importe quel point des arêtes du prisme, on peut faire passer un plan découpant dans le prisme lui-même un triangle dont les trois sommets, évidemment placés sur les arêtes du prisme, posséderont le même nS_4^0. Il en résulte que ce plan, quoique topographiquement plus ou moins incliné, sera mécaniquement un plan de niveau ou d'équilibre puisque les molécules d'eau qui y sont situées n'ayant tendance à se mouvoir dans aucune direction, resteront immobiles.

Si maintenant on désire se rendre compte de la marche des eaux à une profondeur quelconque, 1 000 mètres par exemple, ou mène le plan topographiquement horizontal coupant le prisme à 1 000 mètres de la surface. Par son intersection avec les arêtes du prisme, il donnera naissance à un triangle dont chaque sommet possédera un nS_4^0 différent ou, si l'on veut, puisque la profondeur est la même pour les trois, un S_4 différent.

Par le sommet possédant le plus fort S_4^0, on mène le plan triangulaire d'équilibre mécanique. Les deux triangles découperont res-

pectivement sur chaque face du prisme deux droites, l'une oblique le long de laquelle les molécules d'eau ne seront sollicitées par aucune force, l'autre horizontale le long de laquelle les molécules, semblables aux molécules liquides dans deux vases communiquants au-dessus d'un plan commun de niveau, couleront de l'extrémité à plus faible densité S_4^0 vers l'extrémité de plus forte densité, avec une vitesse proportionnelle au gradient des densités, c'est-à-dire à la différence des densités aux deux extrémités divisée par la distance de ces deux extrémités.

Dans le triangle isobathe, on aura donc en direction et en intensité les trois composantes de mouvement suivant les trois côtés. On construira la résultante unique qui représentera en direction et en intensité la marche des molécules d'eau dans ce plan, c'est-à-dire le courant.

Son plongement en montant ou en descendant sera donné par l'angle formé par la résultante déjà trouvée, avec le plan d'équilibre mécanique.

Toutes ces constructions purement graphiques ne s'appuient que sur des données graphiquement mesurables. Il sera par conséquent possible, avec la règle et le compas, d'avoir à une profondeur quelconque les caractéristiques du courant régnant.

Les caractéristiques statiques S_4^0, l'halogénie et la teneur en acide sulfurique en chaque station, représentées par des courbes continues, de la surface jusqu'au fond, montreront à l'avance, par leurs irrégularités, à quelles profondeurs se trouveront les courants les plus importants et, après la découverte et la mesure de ces courants, elles serviront de sanction au résultat obtenu en montrant qu'il s'agit bien d'une même personnalité d'eau marine. Cette personnalité est évidemment susceptible de se modifier ; elle le fait en réalité puisque le courant finit le plus souvent par s'annuler, mais elle ne se modifie que lentement, de proche en proche et telle est la raison pour laquelle il convient de ne pas prendre des stations par trop éloignées les unes des autres. Un courant profond étant découvert, on devra le suivre de proche en proche, comme on débrouillerait un fil emmêlé.

On remarque que ce qui a été dit des courants de surface se dirigeant du bord des continents vers le centre des océans n'est qu'un cas particulier de la théorie générale. En effet l'eau voisine des continents étant presque toujours plus douce que celle du centre, le premier plan profond d'égal nS_4^0 à partir de la surface, se trouve évidemment surmonté d'une couche plus épaisse au bord, d'où part le courant, qu'au centre où il aboutit. D'ailleurs, au bord, l'affaiblissement de densité c'est-à-dire l'élévation de niveau ne cesse de s'accroître grâce à l'apport continu d'eau douce aussi bien par les fleuves que par le suintement sous-marin. Mais il est évident que la méthode physique et graphique de découverte et de mesure des courants décrite précédemment ne s'applique avec précision qu'aux courants profonds et il serait absurde de vouloir la faire servir à l'étude des courants superficiels ou de petites profondeurs. Dans ces régions, l'effet des variations de la densité est modifié de la façon la plus marquée par les effets incomparablement plus puissants du vent, des marées, des glaces, de la configuration géographique et du reste.

La comparaison des $S\theta_4$ sur un plan de profondeur, pour suivre la marche d'un courant, ne saurait être suppléée par la comparaison des θ sur ce même plan, quoique la carte des θ soit évidemment plus facile à établir puisque les mesures de températures sont immédiatement obtenues sur place et n'obligent à aucun travail de laboratoire. Il est certain que pour deux échantillons d'eau ayant sensiblement le même S_4^0, il y aura marche du plus chaud, plus dilaté et plus léger vers le plus froid moins dilaté, plus lourd et par conséquent situé à un niveau physique plus bas, en d'autres termes, du θ le plus fort vers le θ le plus faible. C'est l'explication des courants allant de l'équateur vers les pôles. Mais il n'en est pas toujours ainsi et si deux échantillons ont leur S_4^0 très différent, il pourra arriver que la marche soit inverse, c'est-à-dire du θ plus faible vers le θ plus fort parce que le S_4^0 de l'un, peu salé mais très froid, sera encore plus lourd que le S_4^0 de l'autre, très salé mais très chaud. Le phénomène s'observe à la rencontre du courant du Labrador avec le Gulf-Stream sur les bancs de Terre-

Neuve, le premier ne pouvant se détourner du second, passe par dessous en le soulevant et en l'étalant.

On est ainsi amené à recueillir le plus grand nombre possible d'échantillons d'eaux sur une même verticale, en pleine mer et à s'efforcer de grouper ces sondages par trois dans le voisinage les uns des autres. Tel est le motif qui rend si précieuse la bouteille imaginée par le Dr Richard. Comme elle est légère, on en superpose plusieurs sur le même fil de sonde : munies chacune de leur thermomètre et d'une hélice Magnaghi ; elles se renversent et se ferment toutes en même temps par un faible relèvement du fil. Leur capacité est médiocre car elle n'est que de 300 grammes environ ; cependant elle suffit amplement à fournir l'eau nécessaire aux diverses manipulations. C'est un excellent instrument d'où sortiront certainement les lois encore inconnues de la circulation abyssale.

Les fiches de séries servent encore à dresser les cartes par plans parallèles à la surface. On trace par isobathes le relief du fond correspondant à l'espace à représenter, sans colorier, bien entendu, par teintes dégradées bleues les aires de même profondeur. Au contraire, on teinte en jaune brun toute la portion émergée soit réellement quand la carte se rapporte à la surface, soit fictivement en se guidant sur les isobathes correspondantes quand il s'agit de plans profonds de 500, 1 000 ou d'un nombre quelconque de mètres. On note ensuite sur ces cartes les stations et l'on indique près de chacune d'elles la température, la densité *in situ* ou toute autre donnée. La méthode est longue quoique pas autant qu'on le croirait parce qu'on procède par calques; mais elle est parfaitement sûre. A la condition de se tenir continuellement au courant des travaux exécutés, aucune ne fait mieux ressortir l'état des recherches, les points où de nouvelles données expérimentales s'imposent; nulle ne rappelle plus clairement qu'en océanographie dont les grandes lois sont découvertes, il faut procéder méthodiquement et ne pas éparpiller ses efforts. Dans le cas de la circulation, elle est comparable à la méthode du naturaliste qui découpe au microtome en tranches parallèles un animal mou, examine chaque tranche l'une après

l'autre et y suit chaque vaisseau quelque sinueux que soit son parcours. L'océanographe étudiant les plans parallèles sur chacun desquels il a tracé les isopycnes ou lignes d'égale densité *in situ*, puis les superposant par calques successifs, suivra dans sa marche quelque irrégulière qu'elle soit, un courant quelconque naissant sur l'un d'eux, à la surface ou au fond, montant ou descendant, changeant de direction, contournant les obstacles du fond, s'atténuant progressivement jusqu'à ce qu'il finisse par s'évanouir. Au total cette lenteur, à la supposer réelle, est un bénéfice de temps car elle force à procéder à coup sûr, enregistre méthodiquement les progrès accomplis et signale ceux à accomplir. La méthode par analyses directes et représentation graphique contient la solution de tous les problèmes ; avec elle il n'est besoin que de temps, donnée avec laquelle la science n'a pas à compter, de soin et de bonne foi.

Bien des questions seront à traiter par cette méthode qui, émises avec un nombre trop restreint de preuves, ne sont que des hypothèses appelant une vérification indispensable et maintenant devenue possible. La première, la plus ancienne de toutes, se rapporte à la circulation dite verticale. Les eaux marines échauffées par le soleil dans la zone tropicale se dirigeraient par une route plus ou moins contournée mais superficielle vers les régions polaires boréales et australes. Comme elles se refroidissent et par conséquent s'alourdissent de plus en plus dans les latitudes élevées, elles descendraient sur le fond, retourneraient par raison d'équilibre vers l'équateur, s'y réchaufferaient on ne sait trop pour quel motif puisqu'elles sont supposées être restées sur le fond, remonteraient verticalement — et les mesures directes n'ont fourni jusqu'à présent aucune trace de cette ascension — arriveraient à la surface, s'y réchaufferaient de nouveau pour recommencer le cycle. Cette théorie prête à tant d'objections, est contredite ou, tout au moins, si peu vérifiée par la pratique qu'elle n'est plus guère soutenable. Les mesures récentes tendraient au contraire à établir qu'un même océan bien que formant en apparence une masse unique, Atlantique, Pacifique ou océan Indien, n'est dans ses profondeurs qu'une suc-

cession de cuvettes juxtaposées ayant chacune son régime distinct et remplies d'eaux complètement immobiles ou presque immobiles. L'ensemble est recouvert d'une nappe liquide d'épaisseur variable au sein de laquelle l'agitation se fait de plus en plus sentir jusqu'à la surface même, zone mince d'agitation maximum. La continuation des mesures directes et leur représentation graphique devra seule sanctionner la théorie des cuvettes océaniques. Les mêmes procédés pratiques contrôleront l'exactitude de la théorie de la circulation chimique s'effectuant par diffusion du fond vers la surface et dont j'ai soupçonné l'existence. Les hypothèses sont indispensables à l'homme dont l'ignorance a besoin d'être guidée dans sa recherche de la vérité. Aussitôt que l'on possède l'outil de recherche, tout doit être repris à nouveau ; il n'est plus besoin que de travail et l'hypothèse, si elle est erronée, va rejoindre dans le passé et l'oubli le monceau d'erreurs par lesquelles l'humanité a pendant un temps plus ou moins long tenté d'assouvir son noble désir de savoir. Si elle est confirmée, alors cessant d'être une hypothèse, elle devient la vérité. Nos ancêtres ont travaillé pour nous léguer ce que nous savons; imitons leur exemple, et nous aussi, travaillons pour transmettre à nos descendants le flambeau de la science brûlant d'une plus vive lumière.

LISTE

D'OUVRAGES RELATIFS A L'OCÉANOGRAPHIE

La liste suivante loin de prétendre être même un essai de bibliographie océanographique, n'est qu'une simple indication des ouvrages les plus indispensables à connaître pour les personnes qui voudraient se livrer à l'étude de cette science.

1. *AGASSIZ* (*Alexander*). — Three Cruises of the U. S. Coast and Geodetic Survey Steamer « Blake » in the Gulf of Mexico, in the Caribbean Sea and along the Atlantic Coast of the United States from 1877 to 1880. — 2 vol., Boston et New-York, Houghton, Miffin et C°, 1888. (Voy. 8.)

2. *AIMÉ*. — Recherches de physique sur la Méditerranée. Exploration scientifique de l'Algérie pendant les années 1840, 1841, 1842, publiée par ordre du gouvernement et avec le concours d'une Commission académique. Paris, Imprimerie royale, 1845. 1 vol. in-4° de 211 pages.

3. *ARCTOWSKI et THOULET*. — Rapport sur les densités de l'eau de mer observées a bord de la Belgica. Résultats du voyage du S. Y. Belgica en 1897, 1898, 1899 sous le commandement de A. de Gerlache de Gomery. Rapports scientifiques publiés aux frais du gouvernement belge sous la direction de la commission de la Belgica. Anvers, Imprimerie Buschmann, 1901. (Voy. 30, 77.)

4. *ATTLMAYR* (*Ferdinand*). — Handbuch der Oceanographie und maritimen Meteorologie. 2 vol. aus der Kaiserlich-Königlichen-Hof und Staatsdruckerei. Wien.

5. Beitrage zur Geographie des festen Wassers. Wissenschaftliche Veröffentlichnungen des Vereins fur Erdkunde zu Leipzig. Leipzig. Duncker et Humblot, 1891.

M. FRIEDRICH. — Ueber Niederschlage und Schneelagerung in der Arktis.

Lieutenant Georg HARTMANN. — Der Einfluss des Treibeises auf die Bodengestalt der Polargebiete.

6. Berichte der commission fur Erforschung des östlichen Mittelmeeres, Forschungen im Rothen Meere. — Collection de mémoires ; volumes in-4°, Wien, aus der Kaiserlich-Königlichen Hof-und Staatsdruckerei. — Tirés des Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, relatifs aux Explorations de la « Pola » dans la Méditerranée orientale et la mer Rouge. Les travaux de Konrad Natterer et de Josef Lucksch concernent spécialement l'océanographie pure.

7. *BOGUSLAWSKI-KRUMMEL*. — Handbuch der Ozeanographie. Stuttgart. Verlag von J. Engelhorn, 1887, 2 vol. in-8°. (Voy. 18.)

8. Bulletin of the Museum of Comparative Zöology at Harvard College. — Cambridge. Mass. U. S. A.

E.-C. ANDREWS. — Notes on the limestones and general Geology of the Fiji Islands, with special reference to the Lau group, based upon Surveys made for Alexander Agassiz. 1 vol. in-8°, 50 pages, 1900.

A. AGASSIZ. — The Islands and Coral Reefs of Fiji. 1 vol. in-8°, 167 p., 1899.

A. AGASSIZ. — Reports on the scientific results of the Expedition to the tropical Pacific in charge of Alexander Agassiz by the U. S. Fish Commission Steamer « Albatross ». IV. The coral Reefs of the tropical Pacific, february, 1903. One vol. text. three vol. plates. (Voy. 1.)

9. *CIALDI* (*Comm. Alessandro*). — Sul moto ondoso del mare e su le correnti di esso, specialmente su quelle littorali. Tipographia delle belle Arti. Roma, 1866. (2ª Edizione). 1 vol. in-8°, 693 pages.

10. *DANISH INGOLF-EXPEDITION* (*The*). — Report of the voyage by C. F. Wandel. — Hydrography by Martin Knudsen. Copenhagen. Bianco Luno. 1899. — The deposits of the Sea-Bottom by O. B. Boeggild. — Current bottles by C.-F. Wandel. Copenhagen. H. Hagerup. 1900. (Voy. 16).

11. *DARWIN* (*George-Howard*). — The Tides and kindred Phenomena in the solar System. The substance of lectures delivered in 1897 at the Lowell Institute. Boston, Mass. John Murray. London, 1901. 1 vol., in-8°, 346 pages.

12. *DICKSON* (*H.-N.*). — The circulation of the surface waters of the North-Atlantic Ocean. — Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A. vol. 196. pp. 61-203. London 1901.

13. *DRYGALSKI* (*Erich von*). — Grönland. Expedition der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, 1891-1803. Berlin, W.-H. Kühl, 1897. 2 vol. in-4°.

14. *FOREL* (*F.-A.*). — Le Léman. Monographie limnologique. Lausanne F. Rouge, éditeur. 3 vol. in-8°. *Id.* — Le lac Léman. Précis scientifique. Bâle, Genève, Lyon, H. Georg. 1886. 5 vol. in-8°, 76 pages.

15. Handbuch der nautischen Instrumente. — Hydrographisches Amt des Reichs-marine-Amts. 1 vol. in-8°, 452 p. Berlin. Ernst Siegfried Mitter und Sohn.

16. *KNUDSEN* (*Martin*). — Maaling af Hawandets Temperatur og Saltholdighed ved Hjœlp af Elektrisk Telefombro. Beretning fra Kommissionen for videnskabelig Undersogelse af de danske Farvande. Kjobenhavn. Axel E. Aamodts, 1900. (Voy. 10.)

17. *KOLH* (*J.-G.*). Geschichte des Golfstroms und seiner Erforschung von den ältesten Zeiten bis auf den grossen amerikanischen Bürgerkrieg. Eine Monographie zur Geschichte der Oceane und der Geographischen Entdeckungen. Bremen, C. Ed. Muller, 1868. 5 vol. in-8°, 224 pages.

18. *KRUMMEL* (*Otto*). — Der Ozean : eine Einführung in die allgemeine Meerkunde. 1 vol. in-8°. 285 p. Zweite Auflage. Wien, Tempsky. Leipzig G. Freytag, Prag. F. Tempsky, 1902. Das Wissen der Gegenwart. Deutsche Universal-Bibliothek für Gebildete, 52 Band.

Id. — Reisebeschreibung des Plankton Expedition. 1 vol. in-4°. Geophysikalische Beobachtungen der Plankton Expedition. 1 fasc. in-4°. Ergebnisse der in dem Atlantischen Ocean von Mitte Juli bis Anfang november 1889 ausgeführten Plankton Expedition der Humboldt-Stiftung. Kiel und Leipzig. Verlag von Lipsius und Tischer 1902-1903. (Voy. 7.)

19. *MARSILLI* (*Louis-Ferdinand, comte de*). — Histoire physique de la mer. A Amsterdam. Aux dépens de la Compagnie. (Académie royale des Sciences de Paris). 1725. 1 vol. in-4° de 173 pages.

20. *MAURY.* — Instructions nautiques destinées à accompagner les cartes de vents et de courants. Traduites par Ed. Vaneechout, lieutenant de vaisseau, publiées au Dépôt de la Marine. Paris, Firmin-Didot, frères, fils et Cie 1859, 1 vol. in-4°, 496 pages.

Id. — Géographie physique de la mer, traduit par Terquem. Librairie militaire maritime et polytechnique. J. Correard, Paris 1861. 1 vol. in-8°, 580 pages.

21. *MOHR* (*Friedrich*). — Geschichte der Erde. Eine Geologie auf neuer Grundlage. Bonn 1866. Verlag von

Max Cohen et Sohn. 1 Auflage, 1 vol. in-8° de 524 pages. 2 Auflage, 1875. 1 vol. in-8° de 554 pages.

22. *NANSEN* (*Fridtjof*). — THE NORWEGIAN NORTH POLAR EXPEDITION 1893-1896, Scientific Results. Christiania. Jacob Dybwad, 1902.

IX. THE OCEANOGRAPHY OF THE NORTH-POLAR BASIN.

X. ON HYDROMETERS AND THE SURFACE TENSION OF LIQUIDS.

23. Norwegian North-Atlantic Expedition 1876-1878 (The). Christiania. Grondahl and Sohn. 1882.

LUDWIG SCHMELCK. — CHEMISTRY.

C. WILLE. — HISTORICAL ACCOUNT. — THE APPARATUS AND HOW USED.

H. MOHN. — THE NORTH OCEAN. Its depths, temperature and circulation.

24. *REGNARD* (*Dr Paul*). — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES CONDITIONS PHYSIQUES DE LA VIE DANS LES EAUX. G. Masson, Paris, 1891. 1 vol. in-8° de 500 pages.

25. Report of the Scientific Results of the exploring Voyage of H. M. S. Challenger 1873-1876. London. Eyre et Spottiswode.

JOHN MURRAY and A.-F. RENARD. REPORT ON DEEP SEA DEPOSITS. 1891. 1 vol. in-4°, 525 pages.

JOHN MURRAY. — A SUMMARY OF THE SCIENTIFIC RESULTS obtained at the sounding, dredging and trawling Stations of H. M. S. Challenger, 2 vol. in-4°.

PHYSICS AND CHEMISTRY. Vol I. containing. I. William Dittmar. REPORT ON RESEARCHES INTO THE COMPOSITION OF OCEAN WATER. — II. J.-Y. Buchanan. REPORT ON THE SPECIFIC GRAVITY OF SAMPLES OF OCEAN WATER. III. REPORT ON THE DEEP-SEA TEMPERATURE OBSERVATIONS OF OCEAN WATER taken by the Officers of the Expedition. — NARRATIVE OF THE CRUISE OF H. M. S. Challenger with a general account of the Scientific Results of the Expedition. 2 vol. in-4°.

BUCHAN (*Alexander*). — REPORT ON OCEANIC CIRCULATION, 1895.

26. REPORT of Sixth International Geographical Congress. London 1895. 1 vol. 806 p. London. John Murray.

27. Résultats des campagnes scientifiques accomplies sur son yacht par Albert Ier, Prince souverain de Monaco, publiés sous sa direction avec le concours de M. Jules Richard, docteur ès-sciences, directeur du Musée océanographique de Monaco. Imprimerie de Monaco.

J. THOULET. — ÉTUDE DE FONDS MARINS PROVENANT DU VOISINAGE DES AÇORES ET DE LA PORTION ORIENTALE DE L'ATLANTIQUE NORD. 1901, fasc. XIX, 66 pages.

Id. — ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS D'EAUX ET DE FONDS RÉCOLTÉS PENDANT LA CAMPAGNE DU YACHT « PRINCESSE-ALICE » DANS L'ATLANTIQUE NORD EN 1901, fasc. XXII, 76 pages, 1902. (Voy. 30,3.)

28. *ROUJOUX* (*H. de*). — ESSAI SUR L'ATTERRAGE ET L'ENTRÉE DE LA RADE DE BREST par temps brumeux avec un bâtiment à vapeur. Dépôt des Cartes et Plans de la Marine. Paris. Ad. Lainé et J. Havard 1868. 1 broch. in-8°, 65 pages.

29. *SCORESBY* (*W.-Jun. F. R. S. E.*). — AN ACCOUNT OF THE ARCTIC REGIONS WITH A HISTORY AND DESCRIPTION OF THE NORTHERN WHALE-FISHERY, illustrated by 24 engravings, in two volumes. Edinburgh, printed for Archibald Constable and Co, Edinburgh and Hurst, Robinson and Co, Cheapside, London 1820.

30. *THOMPSON* (*C. Wyville.*) — LES ABIMES DE LA MER. Récits des expéditions des vaisseaux de S. M. le Porcupine et le Lightning pendant les étés de 1868, 1869 et 1870. Traduction par le Dr Lortet, 1 vol. in-8° de 454 pages, Paris, Hachette, 1875.

31. *THOULET*. — OCÉANOGRAPHIE (STATIQUE). Librairie militaire de L. Baudoin et Cie, 30, rue et passage Dauphine, Paris 1890. 1 vol. in-8° de 492 pages.

Id. — OCÉANOGRAPHIE (DYNAMIQUE). Librairie militaire de L. Baudoin. Paris 1896. 1 vol. in-8°, 131 pages.

Id. — GUIDE D'OCÉANOGRAPHIE PRA-

TIQUE. Encyclopédie scientifique des Aide-Mémoire publiée sous la direction de M. Léauté, membre de l'Institut, G. Masson et Gauthier-Villars et fils, Paris. 1 vol. in-8°.

Id. — CARTE BATHYMÉTRIQUE ET LITHOLOGIQUE DES CÔTES DE FRANCE. Atlas de 22 feuilles grand aigle. Paris, Challamel, édit. 17, rue Jacob. (Voy. 273.)

32. *U.-S. COAST and GEODETIC SURVEY.* — Washington Government printing office. (Nombreux travaux à consulter.)

D. SIGSBEE (*Charles*). — DEEP SEA SOUNDING AND DREDGING. A description and discussion of the methods and appliances used on board the C. and G. S. Steamer Blake 1880.

PILLSBURY. — METHODS AND RESULTS. Gulf Stream Explorations. Observations of Currents, 1886.

Id. — Gulf Stream Explorations. OBSERVATIONS OF CURRENTS, 1888 and 1889.

Id. — The Gulf Stream. METHODS OF THE INVESTIGATION AND RESULTS OF THE RESEARCH 1891.

33. VERHANDLUNGEN des Siebenten Internationalen Geographen Kongresses. Berlin 1899. 2 vol. Berlin, W.-H. Kühl, Paris. H. Le Soudier, 1901.

34. *WALTHER* (*Johannes*). EINLEITUNG IN DIE GEOLOGIE ALS HISTORISCHE WISSENSCHAFT. Beobachtungen über die Bildung der Gesteine und ihrer organischen Einschlüsse. Verlag von Gustav Fischer, Iéna, 1893-1894, 1 vol. in-4°, 1055 pages.

35. *WEBER* (*Brüder Ernst Heinrich und Wilhelm*). — WELLENLEHRE auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flussigkeiten mit Anwendung auf die Schall und Licht-Wellen. Gerhard Fleischer, Leipzig 1825, 1 vol. in-8°, 574 pages.

36. *WEYPRECHT* (*Karl*). — DIE METAMORPHOSEN DES POLAREISES. Osterr. Ungar. Arktische Expedition 1872-1874. Moritz Perles. Wien, 1879.

36. *WILD* (*John-James*). — THALASSA. An Essay on the Depth, Temperature and Currents of the Ocean. Marcus Ward et C°, London, 1877. 1 vol. in-8°, 140 pages.

38. Divers.

The Scottish geographical Magazine. Edinburgh, Douglas and Foulis.

The Geographical Journal, London, Edward Stanford. — Transactions of the Royal Society of Edinburgh. — Proceedings of the Royal Society of Edinburgh.

TABLE DES MATIÈRES

I

PROCÉDÉS EMPLOYÉS POUR L'ÉTUDE DU RELIEF SOUS-MARIN

L'Océan, ses contours, sa profondeur 1

Historique : Egyptiens, Chaldéens, Hébreux, Phéniciens . . . 2

Les époques critiques de l'histoire. 4

Les quatre grandes périodes de l'histoire de l'océanographie. . . 5

L'antiquité ; l'école ionienne ; l'école d'Aristote, son influence . 5

L'océanographie pendant le moyen âge 7

On commence à appliquer les procédés de mesure directe . . . 7

Le cardinal Cusanus, inventeur de l'*Explorator profunditatis*. . . 7

Marsigli, créateur de l'océanographie 9

Les premières lois de la topographie sous-marine. 9

Buache et les cartes par isobathes. 10

Tentatives faites pour mesurer exactement les profondeurs sous-marines. 11

Aimé 12

Difficultés d'un sondage : erreur due au frottement, non perception du choc contre le fond, courbure de la ligne de sonde, secousses communiquées à la ligne de sonde, erreur de position. 12

Perfectionnements dus à Aimé. 14

Travaux des Américains : Maury ; appareil de Brooke, son influence sur les progrès de l'océanographie. 15

Travaux allemands, anglais, autrichiens norvégiens, suédois et autres 17

Appareils de sondage divers. . 17

Sondeur Thomson. 17

Le bathomètre Siemens ; difficulté de sa construction ; services qu'il pourrait rendre. 19

Méthodes de levé topographique employées par les hydrographes. 20

Étude des très petits fonds . . 21

Sondages par fonds moyens. . 22

Quelques souvenirs 24

Sondages profonds 26

Appareil de sondage perfectionné. 27

Petits sondeurs 29

Nasses fixes 30

Carte bathymétrique du globe. 30

Résumé ; bâtiments télégraphistes 32

37888

II

LA MER, SES RIVAGES, SES PROFONDEURS ET LE FOND DE SON LIT

Utilité des dessins, schémas et cartes en océanographie. 34

Le développement de la science cartographique : Anaximandre et Dicéarque, Eratosthène, Hipparque, Cratès de Malle, Ptolémée . 35

Les portulans. 38

Principes de la construction des cartes marines 38

Projections cartographiques. . 38

Projection de Mercator; loxodromie 39 39

Distribution des eaux à la surface du globe; inégalité de leur répartition sur les deux hémisphères. 39

Masse des eaux océaniques . . 40

Profondeur maximum. 40

Niveau de la mer, ses variations 41

Intensité de la pesanteur variable en divers lieux 42

Marées 42

Effets de la pression barométrique. 42

Effets de la salure, de la température, de la pluie, de l'évaporation. 42

Nivellements terrestres. 43

Non permanence du contour des côtes 44

Mouvements enstatiques; leur explication 44

Refroidissement du globe . . . 45

Grandes divisions de l'Océan. . 45

Rivage, plage, région littorale socle continental, région de transition, mer improfonde, mer abyssale. 46

Les côtes maritimes. 47

Côtes élevées et côtes basses . 47

Falaises, baies et criques, rochers isolés, vallées et valleuses, estuaires 47

Influence de la nature minéralogique des roches 49

Rias, calas, schermes, calanques 49

Fjords, lochs, inlets 49

Côtes basses : cordons littoraux, lagunes. Côtes à palétuviers, Watten, Marshes, Förden, Bodden 50

Flèches, haffs, dunes. 51

Deltas. 52

Limans et Bugors, Sunderbunds 52

L'Océan, ses caractères généraux 52

Cycle des eaux océaniques . . 53

L'origine de la salure 53

Distribution de la température, de la lumière 54

L'obscurité des abîmes. 54

La pression. 55

Les vagues 55

La vie dans les profondeurs. . 56

Le modelé du lit océanique. . . 56

Les agents qui le produisent : érosion, exaration, abrasion ; pentes sous-marines. 56

Monotomie du modelé. 58

Diversité du modelé au voisinage de la terre. 59

Méthodes de navigation à la sonde. 59

Phénomènes volcaniques . . . 60

Tremblements de mer. 60

Iles volcaniques. 60

Relations entre l'être vivant et le milieu qu'il habite 60

L'océanographie et la zoologie 61

Les animaux marins. 62

Les études de zoologie marine ; histoire de leur développement. . 63

Forbes et le zéro de la vie animale 64

Aimé et ses découvertes. . . . 65

Milne-Edwards 65
La vie existe à toutes les profondeurs 65
Benthos, Nekton et Plankton . 66
Application à l'industrie des pêches 67

III

LA CHIMIE DE LA MER

La salure de la mer; son origine 69
Historique : Pline l'Ancien. . . 69
Maçoudi. 70
Boyle, Varénius, Marsigli . . . 76
Bergman, John Murray, Marcet. 71
Mohr ; importance de son œuvre scientifique 72
Forchammer 73
Chimistes océanographes modernes 74
Recherches d'Usiglio sur les résidus d'évaporation de l'eau de mer. . . . . , ... 74
Aimé 75
Knudsen et le rôle chimique du plankton 75
Gaz de l'eau de mer. 75
Récolte des échantillons. . . . 75
Bouteilles de profondeurs . . . 76
Bouteille Richard, ses avantages 77
Basicité de l'eau des mers; ses conséquences 78
L'eau de mer ne possède pas partout une composition identique. 79
Composition moyenne de l'eau de mer 79
Oxygène et azote 81
Tension des gaz. 82
Acide carbonique 83
Acide sulfhydrique ; la mer Noire 84
Les matières organiques. . . . 85
La filtration de l'eau de mer. . 86
L'écume. 86
Matière organique dissoute ; difficulté de son dosage 87
L'ammoniaque libre et albuminoïde 88
Rôle de l'azote ammoniacal . . 89
Rôle du sulfate de chaux . . . 90
Les bactéries marines. 91

IV

LE SOL SOUS-MARIN

Notions des Anciens relativement au sol sous-marin 93
Hérodote, Polybe, Sénèque le Tragique et l'Océanographie. . . 93
La lithologie sous-marine au moyen âge 94
Les géographes arabes et les navigateurs flamands 94
Le P. Kircher et Varénius . . . 94
Marsigli. 95
Les savants italiens du XVIIIe siècle 95
Aimé n'apporte aucune contribution à l'étude lithologique de la mer 96
Premiers succès des Américains. 96
Sir J.-C. Ross et Hooke 96
Bailey et l'examen microscopique des fonds. 96
Pourtalès et Ehrenberg 97
Huxley 98
La nature des fonds est en relation avec les phénomènes s'accomplissant au-dessus d'eux. 98

Agassiz applique à la géologie les découvertes de la lithologie sous-marine. 98
La craie actuelle et la permanence des aires continentales . . 98
Travaux de Delesse, cartes lithologiques actuelles et anciennes. 99
Le comt de Roujoux et la navigation lithologique. 99
Permanence des fonds dans les mêmes localités 100
Murray et Renard. 101
Travaux contemporains 101
Récolte des échantillons de vase. 102
Échantillons sableux. 103
Drague à sable 103
Les fonds rocheux. 105
Examen lithologique du fond à la vue et au son. 105
Précautions à prendre. 105
Constitution générale océanique. 106
Épaisseur inconnue des dépôts. 106
Triple origine des dépôts . . . 106
Débris organiques et débris minéraux cristallins et amorphes. . 107
La genèse d'un grain de sable. 108
Action des vagues sur le fond. 108
Zone d'action des vagues . . . 109
Chute des poussières superficielles. 109
110
Actions subies par les sédiments après leur dépôt sur le fond. 110
L'argile est un résidu définitif. 111
Tassement des dépôts ; ses conséquences géologiques 111
Attraction des solides et des corps en dissolution. 112
Expériences à faire 113
Importance du caractère anguleux ou arrondi des grains de sable 114
Le moindre grain de sable raconte l'histoire des événements auxquels il a assisté. 115
Trajet des sédiments le long des côtes 115
Classification des fonds marins. 115
Tamisage des fonds. 116
Terminologie lithologique : pierres, galets, gravier, sable, vase . 117
Critique des anciennes dénominations 117
Sable vaseux et vase sableuse. 118
Analyse mécanique 119
Examen au microscope 120
Analyse chimique 120
Analyse rapide 119
Cartes lithologiques. 121

V

LE SOL OCÉANIQUE (*suite*)

Les classifications anciennes ; leur critique. 123
Genèse des fonds marins ; fonds terrigènes, d'origine organique, d'origine chimique et d'origine cosmique 124
Fonds terrigènes 125
Usure des sables 125
Les bancs de Terre-Neuve et leur formation. 125
Blocs dénudés par les courants ; blocs transportés 126
Dépôts de triage et de lavage . 126
Fonds variables. 127
Expériences à faire 127
Les vases. 127
Permanence des fonds. 127
Vases bleues, vertes et rouges. 128
La glauconie 129
Relation entre la nature d'un fond et les êtres qui l'habitent. . 129
Fonds volcaniques 130
Distribution des volcans sur le lit océanique 130
Éruptions volcaniques sous-marines 130

Courants volcaniques 130
Variations accidentelles dans la nature du fond au même endroit. 131
Topographie sous-marine des îles volcaniques. 131
Nature des sédiments volcaniques ; minéraux caractéristiques 131
Hypothèse de Murray 132
Les ponces ; leur répartition sur le fond de la mer 132
Fonds d'origine organique. . . 134
Plages à palétuviers. 134
Végétation sous-marine 135
Algues vertes, brunes et rouges. 135
Algues calcaires ; leur rôle en lithologie 135
Flore planktonique 135
Formation des silex dans la craie 136
Algues chromacées des mers froides 137
Algues calcocytées ; coccolithes et coccosphères ; rhabdolithes et rhabdosphères 137
Les diatomées, leur répartition dans l'océan. 138
La mer des Sargasses. . . . 139
Débris de plantes et d'animaux terrestres au fond de la mer. . . 140
Fonds d'origine animale. . . . 140
Dépôts calcaires. 140
Dépôts calcaires côtiers 141
Bancs d'huîtres, de coquilles vivantes et brisées 141
Les Rhizopodes 142
Foraminifères ; leur distribution. 143
Globigérines et Orbulines ; vases à globigérines. 143
Vase à biloculines. 144
Relation entre la distribution des foraminifères sur le fond et à la surface. 144
Vases à radiolaires 145
Passage des vases à radiolaires aux argiles rouges. 146
Éponges calcaires et éponges siliceuses 147
Ptéropodes ; leur habitat. . . . 147
Vases à ptéropodes. 147
Argile abyssale ; ses caractères. 148
Nodules manganésiens, os tympaniques de cétacés et dents de requins. Compacité de l'argile au fond. 149
La genèse des fonds argileux. . 151
La dissolution supposée du calcaire dans les profondeurs ; critique de l'hypothèse. 151
Origine de la craie ancienne ; est-elle identique à la vase à globigérines actuelle 142

VI

LES SÉDIMENTS CHIMIQUES, COSMIQUES, ÉOLIENS ET CORALLIENS

Spécialisation croissante des études océanographiques 155
Le rôle scientifiqne des spécialistes 155
Les sédiments chimiques ; notre ignorance actuelle à leur sujet. . 156
Complication de leur étude . . 157
Résidus d'évaporation de l'eau de mer 158
Eau d'imbibition du fond . . . 159
Action de la matière organique. 160
La glauconie ; sa distribution géographique, ses caractères, sa genèse. 161
Zéolithes de formation sous-marine 163
Nodules phosphatés. 164
Nodules manganésiens 165
La dolomie 166
Les poussières d'origine cosmique. 167
Chondres 168
Poussières volcaniques. 168
Palagonite. 169

Poussières terrestres. 169
Magnétite d'origine terrestre; ilménite et fayalite. 169
Analyse et synthèse des phénomènes naturels 170
Iles de corail 171
Espèces corralligènes; polypes et polypiers 171
Hydraires et Bryozoaires . . . 172
Conditions de vie des coraux . 172
Température, profondeur, salure et limpidité de l'eau 172
Distribution géographique des coraux 174
Récifs frangeants et récifs barrières 174
Atolls 174
Théorie de Darwin et de Dana. 174
Théorie actuelle; travaux d'A. Agassiz 175
Porosité des massifs coralliens. 178

VII

LA DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS L'OCÉAN

Inégalité de température des eaux océaniques. 180
Marsigli; premières mesures thermométriques. 181
Difficultés d'une mesure de température profonde. 183
Couches intercalées 183
Influence de la pression. Cavendish. 184
Thermomètre à déversement. . 184
Méthodes de Hales 185
Premières mesures thermométriques 186
Température basse des eaux du fond. 187
Thermomètres entourés de matières isolantes 187
Dupetit-Thouars remédie aux inconvénients de la pression. . . 187
Thermomètres accouplés d'Aimé 188
Premières cartes isothermes. . 188
Thermomètres métalliques. . . 189
Thermomètre Miller-Casella; ses défauts 190
Thermomètre Negretti et Zambra 191
Thermomètres divers 193
Appareil à indications continues de Regnard. 194
Emploi des thermomètres à la mer 194
Mesures des températures superficielles 195
Représentation graphique des mesures de température. 196
Théories anciennes sur la distribution de la température dans l'océan 197
La navigation thermométrique de Franklin 197
Histoire de l'étude thermométrique du Gulf-Stream 198
Les successeurs de Franklin. . 199
Lois générales de la répartition de la température dans l'océan. . 201
Températures superficielles . . 202
Distribution de la température en profondeur : couche de variation brusque 203
Hypothèses anciennes sur la température du fond. 204
Effets de la congélation 205
Chaleur spécifique de l'eau de mer. 205
La mer régulateur thermique du climat. 206
Zone profonde de calme et zone superficielle d'agitation 208
Effets de la densité 209
Origine de la basse température du fond de l'océan 210
Effets de la température sur les animaux marins. 211

Température propre des êtres vivant dans les eaux 212
Expériences de Regnard. . . . 212
Extrêmes de température supportés par les animaux marins. . 213
Applications pratiques. 214
État des poissons retirés des grandes profondeurs. 215
Cantonnement des faunes marines 215
La crête Wyville-Thomson . . 215

VIII

OPTIQUE, COMPRESSIBILITÉ, DENSITÉ ET SALINITÉ DE LA MER

Historique. Wood 218
Marsigli établit les principes de l'optique de la mer 218
Bouguer, Muncke, Kotzebue, Wilkes et Bérard 219
Le P. Secchi et le comdt Cialdi; Luksch. 220
F.-A. Forel 220
Nature de la lumière. 221
Spectre. 221
Absorption de la lumière dans l'eau ; impressions d'un scaphandrier 222
Disque de Secchi et transparence de la mer 223
Causes modifiant la transparence de la mer. 224
Coloration. 225
Coloration horizontale. 225
Expériences de Spring. 226
Influence de la température sur l'absorption lumineuse. 227
Effet des particules en suspension. 227
Expériences des savants suisses. 228
La photographie sous-marine . 229
Lunette d'eau 229
Expériences de Regnard ; la durée de l'insolation au sein des eaux 230
Diminution d'intensité de la lumière en profondeur. 231
Pénétration des rayons actiniques dans l'eau. 231
Mesures de Forel 232
Emploi des plaques photographiques. 232
Formation de la chlorophylle; limite de la vie végétale au sein des eaux. 233
Fluorescence 234
Influence de la lumière sur les animaux marins. 234
Pigments de la peau. Mimétisme. 235
Phosphorescence 236
Mer phosphorescente, mer de lait. 238
Couleur de la mer. 238
Influence de la salure, de la température, du plankton. . . . 239
Mesure de la coloration de la mer; gamme de Forel. 240
Miroir incliné 241
Indice de réfraction. 242
Polariscope d'Arago. 243
Compressibilité; mesure du coefficient de compressibilité 244
Expériences d'Aimé 244
Tension des gaz dissous dans la mer 246
Influence sur la construction des bouteilles destinées à recueillir l'eau des profondeurs 247
Expériences synthétiques du Dr Regnard sur les effets de la pression sur les animaux 248
Poids spécifique de l'eau de mer. 250
Mesure de la densité; densité normale et densité *in situ*. . . . 251
Graphique de correction. . . . 251
Importance de ces considérations relativement à la statique et à la dynamique de l'océan . . . 252
Emploi des aréomètres. 253
Balance de mer. 255
Maximum de densité de l'eau de mer. 255
Salinité de l'eau de mer. . . . 256

IX

LES PÊCHES PROFONDES

Relations entre l'être vivant et le milieu qu'il habite. 258
L'être vivant est un instrument de mesure. 258
Conditions de la vie dans les profondeurs. 258
L'étude des fossiles. 260
Le rôle du zoologiste et de l'océanographe en géologie. 262
La géologie nouvelle 263
Une station océanographique en haute mer. 264
Mesure de la profondeur. . . . 265
La nasse 265
Les palangres. 265
Le chalutage 267
Le tamisage, les fauberts et la récolte des échantillons 269
La note de couleur 270
Les requins. 271
Le travail à la mer; le travail dans le laboratoire 273
Les haveneaux; le tramail . . 273
La pêche du plankton. 274
La pêche des cétacés 274

X

LA GLACE

Les trois états de l'eau : vapeur eau et glace 279
Température de congélation et température de fusion 279
Effet de la pression sur la congélation 280
Effet des espaces capillaires . . 281
Les solutions salines. 281
Chaleur latente de fusion de la glace; calorie; effet sur le climat. 281
La densité de la glace est moindre que celle de l'eau; conséquences. 282
Coefficient de dilatation de la glace 283
Formation et flottaison des icebergs; leur transport par les courants marins. 284
Destruction des roches par la gelée : aspect du Spitzberg . . . 284
Les bancs de Terre-Neuve . . . 285
Moulage de la glace. 285
Explication de sa plasticité. . . 286
Phénomène du regel. 286
Congélation de l'eau de mer. . 287
Concentration séparée des sulfates et des chlorures. 287
Application à l'hygiène des explorateurs polaires. 288
Cause de la rupture de la glace. 288
Influence sur le coin thermique. 289
Conductibilité thermique de la glace. 289
Glaces palœocrystiques 289
Évaporation de la glace. . . . 290
Effet d'un repos complet. . . . 290
Répartition des climats sur le globe; inclinaison de l'axe terrestre sur l'écliptique. 290
Durée variable des jours et des nuits 291
Causes astronomiques diverses. 292
Sol gelé de la Sibérie 292
Cartes isothermes, pôles de froid. 292
Désagrégation des roches par la gelée 294
Aspect des régions polaires . . 294

Banquette ; dépôts ocreux, tourbières, guano, bois flotté. 294
La neige 295
Limite des neiges persistantes . 296
La glace de glacier 297
Névé 297
Formation d'un glacier, sa ressemblance avec un fleuve. 298
Crevasses, séracs, moulins, moraines ; roches striées et moutonnées 299
Boue glaciaire. 301
Icebergs 302
Inlandsis 305
Glace d'eau douce. 306
Glace de mer ; l'eisbrei, la banquise, le pack. 306
Les saisons polaires. 310
Salure des eaux des mers polaires 310

XI

LES VAGUES ET LES MARÉES

Les vagues sont dues au vent . 311
Étude des vagues par Marsigli, Franklin et Aimé 311
Les frères Weber 312
La houle. 312
Caractéristiques d'une vague : vitesse, longueur, largeur, période et hauteur. 312
Mesure de la vitesse 313
Mesure de la période 313
Mesure de la longueur et évaluation de la largeur 313
Mesure de la hauteur, son importance 313
Graphique du mouvement d'un navire ; roulis et tangage. 314
Erreur dans l'évaluation de la hauteur d'une vague 314
Coupes de vagues 315
Étude expérimentale des vagues 316
Insuffisance de la terminologie océanographique française. . . . 316
Auge à ondulations 316
Mouvement d'une molécule liquide ; trochoïde. 317
Molécules profondes. 317
Profondeur à laquelle se fait sentir le mouvement des vagues. 318
Travaux du commandant Cialdi. 318
Méthode des frères Weber. . . 319
Appareils d'Aimé 319
Trace-vagues de l'amiral Paris. 320
Trace-vagues de Froude. . . . 321
Vagues forcées 321
Interférences 322
Mer démontée des cyclones . . 322
Mascaret 323
Appareil à interférences des frères Weber 323
Renforcement des vagues . . . 324
Vagues de tremblements de terre 324
Raz de marée 324
Influence du fond 325
Ressac. 326
Arrivée des vagues sur une plage 326
Courant côtier. 326
Kaléma, rollers, vagues de fond, marrobio, tascas, resaca. 326
Clapotis , ... 327
Action de la pluie et de la grêle. 328
Action de la brume et de l'huile. 328
Pression exercée par les vagues. 329
Seiches des lacs et de la mer. . 330
Limnimètres et plémyramètre . 330
Lois des seiches. 331
Nœuds et ventres de vibration. 331
Causes des seiches. 332
Le phénomène de l'Euripe . . . 332
Marées ; leurs caractéristiques. 333
Amplitude des marées ; zéro des cartes marines. 334
Établissement du port 334

Idées des anciens sur la nature des marées 334
Le moyen âge. 335
Études modernes 335
Marégraphes. 336
Explication des marées basée sur les lois de la gravitation et des interférences. 337
Action de la lune. 337
Théorie de G. H. Darwin . . . 338
Action du soleil. 338
Complication des phénomènes; leurs causes. 339
Inégalités diverses, mensuelle, parallactique. 339
Actions diverses 340
Nutation, pression barométrique vent, apport d'eau douce, fond . 340
Marées des lacs et des petites mers 341
Irrégularités. 341
Prévision des marées 342
Appareils de prédiction des marées 343
Lignes cotidales. 342
Courants de marées. 343

XII

LES COURANTS MARINS

Circulation océanique 345
Méthode d'étude. 345
Circulation superficielle et circulation profonde, leur limite est impossible à établir. 346
Historique : antiquité 347
Aspect des courants. 347
Le moyen âge. 348
Les Northmen 349
Christophe Colomb 350
Méthode d'observation par la déviation de la ligne de sonde. . 350
Perfectionnements apportés aux instruments de mesure 350
Hypothèses diverses sur les causes des courants. 351
Marsigli. 351
Franklin et le Gulf-Stream . . . 352
De Tessan. 352
Aimé, son mesureur de courants 353
Relation entre la force des courants et l'aspect des grains de sable 353
Découverte de la superposition de certains courants. 353
Observation des courants par flotteurs libres le long de la côte. 353
Nasse profonde; bouée fixe. . 354
Flotteur de Mitchell. 354
Drague à courants 355
Bouteilles Hautreux 355
Flotteurs libres, leurs inconvénients. 355
Épaves et épaves artificielles . 356
Procédé par le point observé et le point estimé 356
Roses de courants. 357
Traits généraux de la circulation superficielle. 358
Influence des courants marins sur l'histoire de l'humanité . . . 359
Influence géographique des courants 359
Le Gulf-Stream 360
Les causes de la circulation océanique : le vent 362
Calculs de Zöppritz 362
Prompt affaiblissement de l'action du vent en profondeur . . . 363
Influence du poids spécifique des eaux. 364
Sources sous-marines 364
Niveau de densité. 365
Effet de la rotation terrestre. . 366
Zones de pluies équatoriales. . 366
Influence des glaces polaires. . 366
Influence des marées 367

Actions mécaniques; contre-courants 367
La mer des Sargasses 367
Courants de déviation. 368
Courants de compensation. . . 369
Cuve à courants. 369
Limite entre la circulation superficielle et la circulation abyssale 369
Courant du Labrador 370
Courants volcaniques 371
Caractéristiques, physiques et chimiques des courants abyssaux 372
Densité normale à zéro 373
Halogénie. 373
Poids d'acide sulfurique. . . . 375
La densité *in situ* est une caractéristique dynamique 375
Gradient de densité 378
Éude graphique des courants profonds. 378
Graphiques de sections verticales 380
Plans parallèles successifs. . . 380
Circulation verticale. 381
Circulation chimique. 382

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

J. HOLZER
BINDER
BOSTON, MASS.